



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TUOMAS NORRI
PORAUKSENAIKAISEN MITTAUKSEN ARVO
KALLIOTILARAKENTAMISESSA

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
talouden ja rakentamisen tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 3.6.2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

TUOMAS NORRI: Porauksenaikaisen mittauksen arvo

kalliotilarakentamisessa

Diplomityö, 57 sivua, 0 liitesivua

Elokuu 2015

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastajat: Professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: MWD, kalliotilarakentaminen, tunnelilouhinta

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää analysoivan porauksenaikaisen mittauksen sovelluksen (MWD-analyysisovellus) arvopotentiaaleja kalliotilarakentamisessa. Lisäksi pyrkimyksenä oli löytää sovellukselle kehityskohteita, joilla eri toimijat voivat kehittää louhintaprosessiaan. Arvopotentiaaleilla tarkoitetaan sovelluksen ominaisuuksia, joista on hyötyä louhintaprosessissa verrattuna siihen, että louhinta suoritetaan ilman MWD-analyysisovelluksen käyttöä.

Tutkimus suoritettiin samanaikaisesti Sandvik Mining and Construction Oy:n MWD-sovelluksen kenttätestin kanssa. Sovelluksen arvopotentiaalien selvittämiseksi tutkimuksessa luotiin skenaarioita louhintaprosessista, joita käytiin läpi kenttätestaajan kanssa yhteisissä palaverissa. Skenaarioissa verrattiin louhintaprosessia, jossa MWD-sovellusta käytetään ja jossa MWD-sovellus ei ole käytössä.

Sovelluksen arvopotentiaalien määrittelyn painopiste oli MWD-analyysin avulla tehtävän kallion tiivistys- ja lujitustarpeen määrittelyn mahdollisuuksissa. Arvopotentiaaleja tarkasteltiin lisäksi huomioimalla kalliorakentamisen kehitysnäkymät ja etenkin lisääntyvien dokumentointimääräysten ja tietomallipohjaisen hanketoteutuksen ollessa osa louhinnan lähitulevaisuutta.

Tutkimuksessa havaittiin, että MWD-analyysisovelluksella saatavalla ennakkotiedolla porattavasta kalliomassasta voi olla louhintaa nopeuttava ja parantava vaikutus useassa eri louhinnan vaiheessa. Myös sovellukseen liittyvästä geologisen kartoituksen mahdollisuudella katsottiin olevan hyötyä etenkin kalliotilan käytönaikaisten ongelmatilanteiden tarkastelussa sekä tietomallipohjaisessa hanketoteutuksessa. Sovelluksen hyötyjen realisointi edellyttää kuitenkin MWD-analyysillä saatavan informaation oikeellisuutta.

MWD-analyysisovellus on potentiaalinen työkalu louhintaprosessin optimoinnissa. Tässä tutkimuksessa esitettyjen tulosten realisoidumiseksi sovellus vaatii kuitenkin vielä kehitystyötä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering Technology

TUOMAS NORRI : Value of Measurement While Drilling -technique

in underground construction

Master of Science Thesis, 57 pages, 0 Appendix pages

August 2015

Major: Earth and Foundation Structures

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: MWD, tunneling

The aim of this study is to find value potentials of Measurement While Drilling-analysis (MWD-analysis) application in tunnel excavation. In addition there is aim to find development targets of application to allow development of excavation process of tunneling entrepreneur. Value potentials are features of application, which tunneling entrepreneur can find beneficial in excavation process compared to process where application is not used.

This study was made simultaneously with field test of Sandvik Mining and Construction Oy's MWD-application. To find out applications value potentials, there was made scenarios of excavation process, which were reviewed in meetings with field test entrepreneur. In scenarios there was compared excavation process with and without use of MWD-application. Value of application was evaluated by benefits of MWD-application in scenario situations.

Focus of value potentials was in situations where MWD-application is used to determine consolidation and grouting need of rock mass. In addition value potentials were analyzed by taking into account trends of tunnel excavation, especially progressive documentation of excavation and Building Information Model -project execution in near future.

As a result there was noticed that received foreknowledge of rock mass gathered by MWD-application can be beneficial in several different phases of tunnel excavation process. In addition the geological mapping possibility of MWD-application was noticed beneficial especially in situations of inspecting problems in geology when tunnel is in use.

Benefits of MWD-application to be realized will need perfect correlation between MWD-analysis and rock mass properties. MWD-application is a potential tool for tunnel excavation. However, it will need more development to achieve perfect results of MWD-analysis.

ALKUSANAT

Ensimmäisenä esitän Sandvik Mining and Construction Oy:lle suuren kiitoksen mahdollisuudesta mielenkiintoisen diplomityön tekemiseen. Työn ohjaajana toimi professori Pauli Kolisoja, jota haluan kiittää työni ohjaamisesta ja uskomisesta diplomityön ja muiden opintojen loppuun saattamiseen. Suuri kiitos kuuluu myös Miika Huikkolalle ja Tuomo Piriselle, jotka asiantuntevasti ohjasivat tutkimustyötäni ja mahdollistivat osallistumiseni mielenkiintoisen projektin läpivientiin ja oppimiseen yli tutkimuksen rajojen. Haluan myös kiittää muuta Sandvik Mining and Construction Oy:n henkilökuntaa, jotka osallistuivat työni avustamiseen.

Suuri kiitos kuuluu myös kaikille opiskeluaikanani tapaamille ihmisille. Monet ovat tukenut minua opinnoissani ja monien kanssa on opintojen ulkopuolella vietetty unohtumattomia hetkiä. Ilman laajaa ystäväverkostoa ja sen antamaa tukea olisi opinnoista selviäminen ollut huomattavasti vaikeampaa, jopa mahdotonta. Viimeisenä haluan kiittää perhettäni saamastani erittäin merkittävästä tuesta koko opiskeluaikanani.

Tampereella 4.8.2015

Tuomas Norri

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Kallioperän ennakkotutkimukset kalliotilarakentamisessa	3
2.1 Kallioperän ennakkotutkimusten merkitys	3
2.2 Kallioperäkartat	4
2.3 Kallionäytekairaus	6
2.4 Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät	8
2.4.1 Magneettiset reikämittaukset	9
2.4.2 Sähköiset reikämittaukset	10
2.4.3 Sähkömagneettiset reikämittaukset	11
2.4.4 Radiometriset reikämittaukset	11
2.4.5 Seismiset reikämittaukset	12
3. Tunnelilouhintasykli ja tunnelinlouhintakalusto	14
3.1 Poraus ja panostus	14
3.1.1 Poraus - tunnelilouhinnan perustyo	14
3.1.2 Panostus	18
3.2 Räjätys ja tuuletus	19
3.2.1 Räjätys - kalliota irrottava tapahtuma	19
3.2.2 Tuuletus - räjähdyskaasujen poistamiseksi	20
3.3 Lastaus ja kuljetus	21
3.4 Tiivistys ja lujitus	21
3.4.1 Injektoinnin periaatteet ja menetelmä	21
3.4.2 Ruiskubetonointi	23
3.4.3 Kalliopultit	24
3.5 Tunnelilouhintakalusto	25
3.5.1 Porauslaitteet	25
3.5.2 Muut tunnelilouhinnassa käytettävät laitteet	27
3.5.3 Louhinnan tukena käytettävät ohjelmistot	28
4. Porauksenaikainen mittaus - MWD	31
4.1 Johdatus porauksenaikaiseen mittaukseen	31
4.2 Porauksenaikaisen mittauksen käyttömahdollisuudet	32
4.2.1 Geologinen kartoitus	32
4.2.2 Poraus- ja panostussuunnittelu	33
4.2.3 Lujitustarpeen määrittäminen	33
4.2.4 Injektointitarpeen määrittäminen	34
4.3 Porauksenaikaisen mittauksen rajoitukset	35
5. Arvoanalyysi - MWD -analyysin arvopotentiaalit tunnelilouhinnassa	37
5.1 Arvonmäärittäminen periaatteet	37

5.2	MWD -analyysin arvopotentialit	38
5.2.1	Luodut skenaariot ja niiden arvopotentialit	38
5.2.2	Kenttätestin aikana löytyneet arvonäkökohdat	46
5.3	Kenttätesti ja sen onnistuminen	47
6.	Tunnistetut kehityskohteet ja sovelluksen mahdollisuudet	49
6.1	Asiakaslähtöiset kehityskohteet ja toimenpiteet	49
6.2	MWD -datan käytön kehittäminen tunnelilouhintaprosessissa	50
6.3	Muita kehitysideoita ja mahdollisuuksia	52
7.	Yhteenveto	53
	Lähteet	55

LYHENTEET JA MERKINNÄT

MWD	Porauksenaikainen mittaus (engl.: Measure While Drilling)
RQD	Rock Quality Designation
BIM	Building Information Model
LHD	Maanalainen lastauskone
iSURE	Sandvik Underground Rock Excavation software
Q-luku	Rock Mass Quality system
Q'-luku	Q-luvusta johdettu kallion luokitusluku, joka ei ota huomioon kallion jännitystilaa

1. JOHDANTO

Alati kehittyvä teknologia on johtanut louhintaprosessin nopeutumiseen ja helpottumiseen. Vuosisadan aikana tapahtunut muutos käsikäyttöisten poralaitteiden käytöstä täysin automatisoituihin poralaitteisiin on edesauttanut louhintaprosessin kehittymistä. Tietokoneohjauksen myötä myös poralaitteiden tiedonhankintaominaisuudet ovat kehittyneet ja mahdollistaneet poralaitteiden varustamisen datarekisteröintiä tekevillä järjestelmillä. Datarekisteröinnin avulla poralaitteesta pystytään keräämään suuria määriä informaatiota samanaikaisesti, kun poralaite poraa kalliota. Datankeruu- eli Measurement While Drilling (MWD) -järjestelmillä kerätään porausdataa, jota pyritään hyödyntämään porattavan kalliomassan ominaisuuksien arvioinnissa. Datan tulkinnan oikeellisuus on avainasemassa sen hyödyntämisen mahdollisuuksissa. Häkan Schunnesson on tutkimuksessaan havainnut MWD-datan ja sen analysoinnin olevan yhteydessä kalliossa esiintyvän rakoilun kanssa [17]. Datarekisteröinnin ollessa mahdollista itse louhintaprosessia häiritsemättä, on sillä saatavan kalliomassan ominaisuustiedon käytöllä paljon potentiaalia louhintaprosessin eri osaprosessien kehittämisessä ja optimoinnissa.

MWD-dataa on käsitelty useissa tutkimuksissa, mutta sitä ei ole vielä laajalti hyödynnetty tunnelilouhinnassa ainakaan Suomessa, huolimatta tutkimustulosten osittain lupaavista tuloksista kalliolaadun arvioinnissa. Datankeruu on prosessina nopeaa ja sillä saatavan informaation määrä on suuri. Ongelmana nähdään yleisesti riittävän ajan puute analyysitulosten tulkintaan ja arviointiin. Tämä koskee etenkin sellaisia tapauksia, jossa louhintaprosessi pitäisi pysäyttää MWD-datan analysointia varten. MWD-järjestelmät ovat kuitenkin käytössä lähes jokaisessa tunnelilouhintaprojektissa Norjassa, missä kerättyä dataa hyödynnetään louhinnan apuvälineenä [11]. Tämä seikka on otettava huomioon, kun mietitään, miksi MWD-järjestelmät eivät ole laajalti käytössä Suomessa.

Tämän diplomityön lähtökohtana on Sandvik Mining and Construction Oy:n kiinnostus MWD-datan käytön kehittämiseksi etenkin injektointi- ja lujitustarpeen määrittämisessä. Tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella analysoidun porausdatan käytön mahdollisuuksia ja sen arvopotentiaaleja tunnelilouhinnan eri osaprosesseissa. Arvopotentiaalien tarkastelussa pyritään kattamaan koko louhintaprosessi ja analysoimaan minkälainen arvo porattavasta kalliomassasta saatavalla informaatiolla on louhinnan suorittajalle. Tutkimus toteutettiin samanaikaisesti MWD-sovelluksen kenttätestin kanssa, mikä mahdollisti lou-

hintaa suorittavan osapuolen intressien huomioon ottamisen. Sovelluksen arvopotentialien tutkimista varten luotiin louhinnan osaprosesseista skenaarioita, joiden avulla sovelluksen käytön arvoa pyrittiin määrittämään esittelemällä ne louhintaurakoitsijalle. Tutkimuksen tarkoituksena ei ole löytää sovelluksen käytölle tarkkaa rahallista arvoa, vaan tarkastella millä eri tavoilla sovelluksen käyttäjä voisi hyödyntää sovelluksen tarjoamaa informaatiota tuotantoprosessissaan.

2. KALLIOPERÄN ENNAKKOTUTKIMUKSET KALLIOTILARAKENTAMISESSA

Tässä kappaleessa käydään läpi maanalaisen tilan rakennusprosessin eri vaiheita. Ensimmäisenä käsitellään kallioperään tehtäviä ennakkotutkimuksia, joiden perusteella selvitetään kallioperän ominaisuuksia, johon kalliotila sijoitetaan. Tämä ohjaa rakennussuunnittelua ja itse louhintatyötä merkittävästi. Itse kalliotilan suunnittelutyötä ei tässä työssä käydä läpi, mutta kalliotutkimukset suunnittelun esitietona esitellään.

2.1 Kallioperän ennakkotutkimusten merkitys

Kallioperän tutkimusten tarkoituksena on antaa rakennuttajalle, suunnittelijalle ja urakoitsijalle tarpeelliset tiedot rakennuskohteen teknistä ja taloudellista suunnittelua, rakentamista sekä rakentamisen ympäristövaikutusten arvioimista varten [21]. Tutkimusten raportoinnin on tapahduttava muun suunnittelun aikataulun ja tarpeiden mukaisesti. Tutkimustulokset on esitettävä riittävän tarkasti ja yleisesti tulkittavissa olevilla tavoilla siten, että tutkimusten luotettavuus ja riittävyys sekä tehdyt johtopäätökset ovat kallioteknisen asiantuntijan tai tarkastavan viranomaisen arvioitavissa ja ymmärrettävissä.

Kallioperän tutkimusten laatu ja laajuus vaihtelevat meneillä olevan tutkimusvaiheen mukaisesti. Tutkimuksiin vaikuttavat kohdekohtaisesti rakennuskohde ja sen ympäristö, valitsevat geologiset ja geotekniset olosuhteet sekä muun muassa rakentamismenettely [21]. Tutkimukset vaihtelevat huomattavasti rakennuskohteen mukaan, kun esimerkiksi verraataan suppealle alueelle sijoittuvaa kalliotilaa ja pitkää liikennetunnelia. Tutkimusten suoritus ja kalliosuunnittelu tapahtuvat yleensä rinnakkain. Myös saman suunnitteluvaiheen sisällä tutkimukset etenevät portaittain, jolloin yhden tutkimuspisteen antamaa tietoa käytetään seuraavan tutkimuksen ohjelmoinnissa.

Tutkimuksia tehtäessä tulee ottaa huomioon kallion ominaisuuksien suuret vaihtelut ja vaihtelujen epäsäännöllinen luonne. Hyvä kalliolaatu saattaa vaihtua huonoksi, kallionpinnan korkeus saattaa vaihdella nopeasti sekä primäärijännityskentässä voi esiintyä suuria suunnan ja suuruuden muutoksia. Näistä vaihteluista johtuen on vaativissa kohteissa tehtävä tutkimuksia riittävän tiheästi kielteisten kallio-ominaisuuksien löytymiseksi.

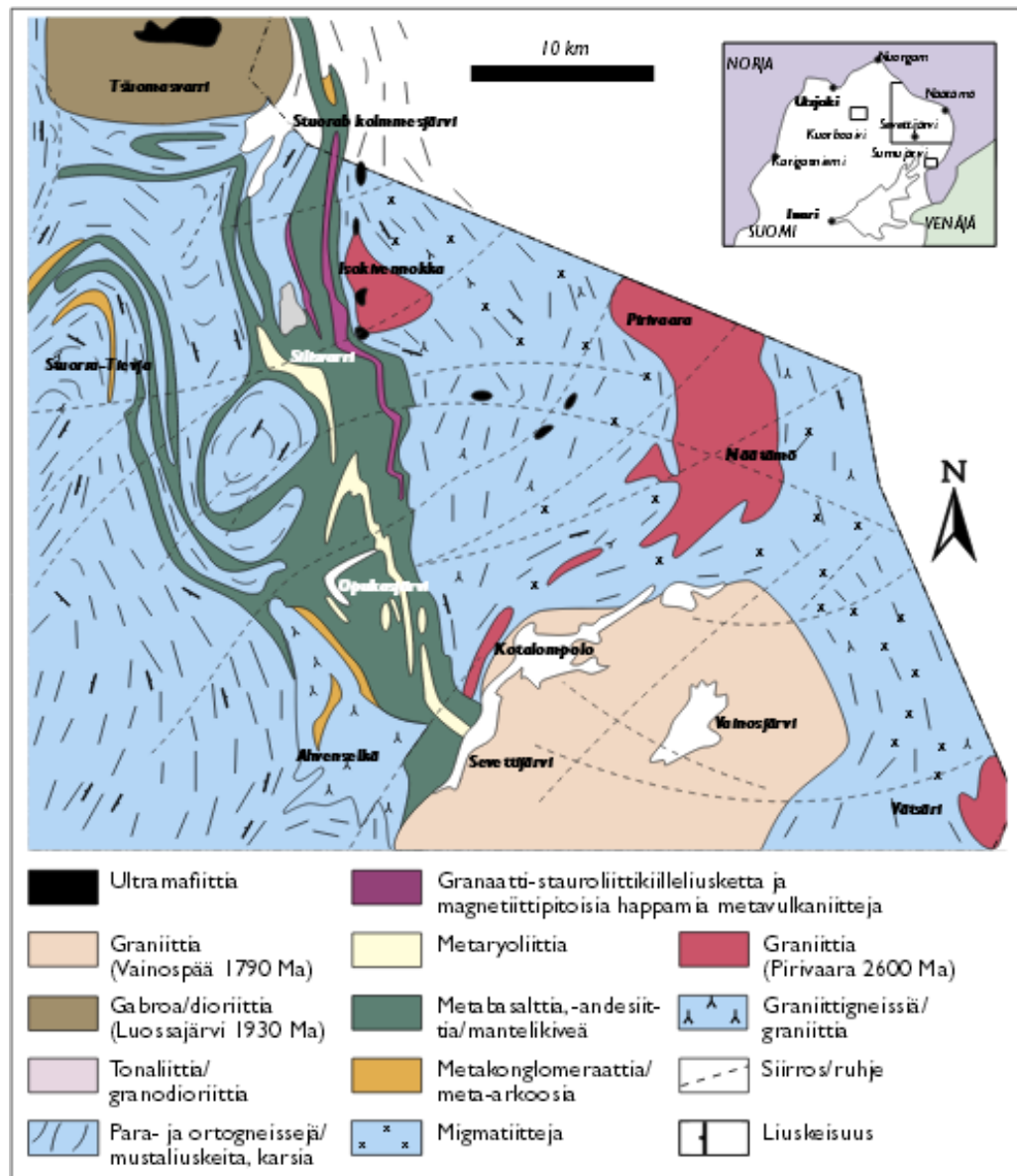
[21]. Tutkimusten mitoituksessa tulee myös ottaa huomioon tutkimuksessa käytettävien menetelmien virherajat ja tutkimusdatan saannin rajallisuus. Tutkimusten riittävyttä arvioitaessa on syytä analysoida seuraukset, jotka aiheutuvat mahdollisista tutkimusvirheistä. Mikäli ennakkotutkimuksista saatava informaatio on vajavaista, on sitä täydennettävä työnaikaisilla lisätutkimuksilla.

Työturvallisuuskäsitteet ovat myös yksi tutkimustarpeen määrittelevistä tekijöistä. Esimerkiksi kallioikaton paksuuden ja kalliotilaan purkautuvan veden määrää pystytään arvioimaan tutkimuksilla. Kalliotutkimuksia on tehtävä aina siinä laajuudessa ettei niiden puute aiheuta työturvallisuuden heikkenemistä. Tutkimusten perusteella on myös tehtävä tuotannonsuunnittelua, jonka perusteella suunnittelija selvittää alustavaa rakentamisaikataulua ja louhintatyön tehtävien kriittisen polun. Kriittisen polun varmistamiseksi tutkimukset kannattaa usein jopa ylimitoittaa. [21].

Tutkimusten osuus rakentamiskustannuksista on yleensä suuruusluokkaa 1-5% [21]. Toisaalta kalliorakennuskohteiden rakennuskustannukset ovat usein nousseet ennakoarvioon nähden runsaasti. Suhteellisen pienellä lisätutkimuspanoksella saatetaan pienentää hankkeen kustannusten nousun riskiä oleellisesti.

2.2 Kallioperäkartat

Suomen kallioperästä on tehty 1:100 000 -mittakaavainen kallioperäkartta-aineisto Geologian tutkimuskeskuksen toimesta vuosina 1948-2007 raaka-ainevarojen kartoituksen, yhteiskunnan kiviaineshuollon ja tieteellisen tutkimuksen tarpeisiin tuotetusta aineistosta. Tämä kartta-aineisto sisältää kivilajitiedot aluerajauksina, kallioperähavainto- ja kaivospisteet sekä oleelliset tektoniset havainnot, litologiset primäärirakenteet, malmimineeraalit ja metamorfiset indeksimineraalit. Kallioperäkarttatietoa jalostetaan yleensä suunniteltaessa esimerkiksi kallioon rakennettavan tilan sijaintia. Kartasta selviävät ruohjavyöhykkeet ja muut heikkousalueet pyritään kiertämään tai tilan sijaintia minimoimaan niiden alueella. [2]. Kuvassa 2.1 on kallioperäkartta selityksineen Taka-Lapin alueelta, mikä on arkeisen kallioperän aluetta. Kuvasta käy ilmi kallioperän mineraalikoostumus sekä kallioperässä esiintyvät vyöhykkeet.



Kuva 2.1: Kallioperäkarta Taka-Lapin alueelta selityksineen. [8].

Kallioperäkartoista saatavaa informaatiota voidaan käyttää kalliotilan sijoittamista suunniteltaessa sekä sen perusteella voidaan suunnitella esimerkiksi tehtäviä kallionäytekai-
rauksia. Kallioperäkartoista saatava informaatio on porauksenaikaista mittausta tarkas-
tellen melko suuripiirteistä, mutta niiden perusteella pystytään arvioimaan tietyn alueen
kalliomassan koostumusta.

2.3 Kallionäytekairaus

Kallionäytekairaus on yksi tärkeimmistä kallion tutkimusmenetelmistä. Sillä saadaan kalliosta lieriönmuotoisia kairasydännäytteitä. Kallionäytekairaus perustuu hiertävään kiertoporaukseen eli kiveä leikataan painamalla ja pyörittämällä timanttiteräkruunua kairausputkiston välityksellä poralaitteistolla kallioon. Kallionäytekairauksella saadaan tarkka tieto kallionpinnan sijainnista sekä kallion laadusta ja etenkin sen rakenteellisesta kiinteydestä ja rakoilusta kairan kallioon tunkeutuneella osuudella. Tuotteena saadaan häiriintymätön näyte kalliosta, josta johtaa nimitys kairaus erotuksena termistä poraus, joka liittyy iskeviin ja murskaaviin porausmenetelmiin. Kairauksella saadut näytteet soveltuvat kivilaatua koskeviin geologisiin ja kallioteknisiin laboratoriotutkimuksiin. Kallionäytekairaukseen kuuluu myös kallion jännitystilamittaukset, mitkä vaativat menetelmää varta vasten porattuja reikiä. [6]. Kyseisen tutkimusmenetelmän esittely rajataan pois tutkielmasta, koska sen yhteys porauksenaikaiseen mittaukseen ei ole tutkimuksen kannalta oleellinen.

Kairausputkiston alimmaisina putki on erikoisrakenteinen terä- eli näyteputki. Sen alimmaisina osa on hiertotyön tekevä timanttikruunu, jonka yleisin halkaisija on 56 millimetriä ja jolla saadaan halkaisijaltaan 42 millimetrin kallionäyte. Irti leikkautunut, alapäästään kalliossa kiinni oleva näyte tunkeutuu kahdesta sisäkkäin olevasta putkesta koostuvaan näyteputkeen. Tämä sisempi näyteputki on laakeroitu suhteessa ulompan putkeen, jolloin näyte pääsee nousemaan häiriöttömästi putkeen. Teräkruunun yläpuolelle asetettu kalvain huolehtii reiän pysymisestä vakioleveydellään, näin reiästä ei tule alaspäin suppenevaa kartiota. [6]

Kun kairaus on lopetettu ja näyteputki nostetaan ylös, on kairattu näyte häiriintymätön näyte kalliosta mikäli työ on tehty huolellisesti ja näyte on kairattu suunnattuna. Näytteen suuntatieto merkitään viivalla näytteeseen, jota apuna käyttäen saadaan tieto näytteeseen sisältyvien suuntasuureiden kompassisuunnasta. Tärkein suuntasuureista on reiän lävistämien luonnonrakojen suunta. Myös venymä ja liuskeisuus ovat tasomaisia suuntasuureita, jotka saadaan selville suunnatusta näytteestä. [6]

Kallionäytekairauksessa syntyy sileäseinämäinen reikä kallioon. Syntyneistä rei'istä voidaan tutkia lähemmin kallion ja sen sisältämien kivilajien ominaisuuksia geofysikaalisin mittauksin. Rei'istä voidaan tutkia myös kallion hydraulisia ominaisuuksia eli kalliopohjaveden käyttäytymistä, minkä tutkiminen edellyttää tutkimusreikiä. Vesiolosuhteita tutkitaan vesimenekikokeen avulla myös kallionäytekairauksesta syntyneissä rei'issä. Samoin kuin injektointitarvetta määritettäessä, tutkitaan kallionäytekairauksen rei'istä vesi-

menekkikokeen avulla kalliopohjaveden ominaisuuksia. Kalliopohjaveden ominaisuudet vaikuttavat kallion Q-luokituksen määrittämiseen, millä on merkitystä myös kalliotilan lujitustarpeen määrittämisessä. [6]. Kairasydännäyttereikään tehty vesimenekkikoe on menetelmältään samanlainen kuin injektointitarpeen määrittämiseen tehtävä vesimenekkikoe joka on esitetty luvussa 4.2.4. Käyttämällä samalta alueelta kairattuja useampia reikiä tutkimuskohteina, voidaan kallion kivilajijaksoja, rakenteita ja pohjaveden virtausta mallintaa ja luoda kolmiulotteinen kuva kallioista sisältäen sen ominaisuudet.

Kairausten jälkeen geologi tutkii kiviläynteet ja laatii niistä raportin. Geologi määrittelee näytteestä sen kivilaatu- ja rakoilutekijöiden perusteella kalliolaadun kyseisessä mittauspisteessä silmämääräisesti. Geologin näytteestä määrittämiä tekijöitä ovat kivilaji, päämineraalit, rapautuneisuusaste, osasten järjestäytyneisyys, liuskeisuusaste, raekoko, katkossumma, rakoluku eli luonnonrakojen lukumäärä metriä kohden, rakojen keskinäistä etäisyyttä kuvaava RQD-luku, rakukulmat ja -täyte, haarniskaraot, nostot, näytehukka ja kallion Q-luvun rakopintojen laatua ja rakosuuntien lukumäärää kuvaavat tekijät sekä vesimenekkikokeen tulokset. [6]. Kuvassa 2.2 on esitettyä suunnattua kairasydännäyte, joka on koottu laatikkoon tarkastelua varten.



Kuva 2.2: Suunnattu kairasydännäyte [10].

Kallionäytekairauksella hankittu tutkimustieto kallioista voidaan nähdä hyödyllisenä niin kalliotilan suunnittelussa kuin urakoitsijan tarjouslaskennan työkaluna. Tutkituista kallioalueista saadaan dokumentoitua tiedot, jotka koskevat kalliolaatua eli kivilajeja, niiden koostumusta ja rakennusgeologisia ominaisuuksia, pohjavettä ja kallion vedenjohto-

ominaisuuksia. Kyseisillä tiedoilla on käyttöä, kun suunnitellaan kalliotilaa ja sen lujitus- ja tiivistystarpeita. Tiedoilla voidaan luoda erilaisia kallio- ja rakomalleja, joiden avulla voidaan suunnitella kalliotilan sijoittamista kyseiselle alueelle. Tutkimustiedolla on myös merkityksensä kalliotilan toteuttamisen kustannusten suhteen. Urakoitsijalle suunnattuihin tarjouspyyntöasiakirjoihin on liitettävä riittävät kalliolaatukuvaukset, jotta urakoitsijat osaavat ottaa kallion laadun vaikutukset kustannusten määräytymisessä.

2.4 Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät

Kallioperän geofysikaalisista tutkimusmenetelmistä käsittellään tässä työssä vain reikämittausmenetelmät. Monia geofysikaalisia tutkimuksia tehdään maan tai kallion pinnalta, joten niiden koetaan liittyvän vain löyhästi tähän tutkimukseen, jonka painopiste on porauksenaikaisessa mittauksessa ja kalliotilarakentamisessa. Geofysikaalisia tutkimusmenetelmiä käytetään enemmän malminetsinnän ja öljynporauksen yhteydessä, mutta niillä on varmasti käyttöpotentialia myös kalliorakentamisen piirissä. Reikämittausmenetelmiin porauksenaikaisella mittauksella voi mahdollisesti olla yhteyksiä.

Reikämittauksilla voidaan tarkentaa maan pinnalta tehdyillä tutkimuksilla saatua kuvaa tutkimuskohteen sijainnista, rakenteesta, rajoista ja petrofysikaalisista in-situ ominaisuuksista. Reikämittauksilla voidaan myös laajentaa esimerkiksi kairasydämen muodostamaa näytetilavuutta etenkin silloin, kun kairasydänhukka on suurta. Kiven ominaisuuksista esimerkiksi lämpötila ja hydraulinen läpäisevyys voidaan mielekkäästi mitata ainostaan reikämittausmenetelmin. [9]. Kuvassa 2.3 on esitettyinä geofysikaalisten menetelmien arvioituja soveltuvuuskohteita kallion ominaisuuksien mittauksiin, jossa pisteellä merkattu tarkoittaa soveltuvaa ja suluissa oleva piste varauksin soveltuvaa.

MENETELMÄT	MITATTAVA OMINAISUUS													
	Kivilajivaihtelu	Mineralogia	Rakotiheys	Rakojen sijainti	Rakojen suunta	Rakojen avauma	Huokoisuus	Kallion tiheys	Kimmo-ominaisuudet	Lämpötilagradientti	Veden laatu	Vedenjohtavuus	Yksireikämittaus	Monireikämittaus
SÄHKÖISET														
Pistevastus	•		•	•			(•)				(•)		•	
Ominaisvastus, normaali	•		•	•		(•)	•						•	
Ominaisvastus, fokusoitu						(•)					(•)		•	
Pohjaveden ominaisvastus											•		•	
Dipmeter			•	•	•								•	
Latauspotentiaali			•	•	•								•	•
MAGNEETTISET														
Suskeptibiliteetti	•												•	
RADIOMETRISET														
Luonnon gamma	•	•		•									•	
Gamma-gamma	•	•		•			•	•					•	
Neutron-neutron	•	•		•			•				•		•	
SEISMISET														
Akustinen	•		•	•		(•)	•		•				•	
Putkiaalto				•		(•)						•	•	
Pystyluotaus	•			•	•								•	
Monireikämittaus									•					•
SÄHKÖMAGNEETTISET														
Tutka	•		•	•	•								•	•
Transientti	(•)			(•)									•	
LÄMPÖTILA										•			•	

Kuva 2.3: Geofysikaalisten mittauksien arvioitu soveltuminen kallion ominaisuuksien mittaamiseen. [1].

Reikämittausmenetelmiin liittyy tiettyjä erityisvaatimuksia ja näkökohtia. Näitä ovat mitauslaitteiston anturin halkaisija, joka on Suomessa yleensä 46 millimetriä, mitauslaitteiston vedentäiveys ja paineenkestävyys, lämpötilavaihtelujen kompensointi, porasoijan ja kovametallihiukkasten mahdollinen kontaminaatio ja reiän sortuma- ja tukkeutumisvaara. [9].

2.4.1 Magneettiset reikämittaukset

Magneettisia reikämittauksia tehdään kiven susceptibiliteetin mittaamiseksi louhinnan ohjausta varten tai eri kivilajien rajojen määrittämiseksi. Magneetikentän voimakkuuden mittausta kairarei'istä käytetään lähinnä rautamalmien inventointitutkimuksissa kolmikomponenttimittauksena. Susceptibiliteetti mitataan samalla periaatteella kuin induktiivinen johtokyky. Muutokset ympäröivän kiven susceptibiliteetissä ja johtokyvyssä näkyvät siltakytkenään liitetyn vastaanotinkelan impedanssin muutoksina. Saatujen kokemusten perusteella mittauksilla voidaan paikallistaa kivilajikontakteja, joihin liittyy pie-

niäkin muutoksia magneitoitumassa. Muutoksen aiheuttavat pääasiassa magnetiitin ja ilmeniitin pitoisuuserot. Samassa kivilajissa esiintyvät anomaliakohdat ovat olleet muunnosvyöhykkeitä, joihin liittyy magnetiitin ja ilmeniitin hapettumista vähemmän magneettiseksi hematitiksi. Muunnosvyöhykkeillä on ollut selvä korrelaatio kallion rikkonaisuusvyöhykkeisiin. [9].

Magneettista kolmikomponenttimittausta mitataan reikämittaukset mahdollistavalla flux-gate -elementeillä. Anturissa on kolme kohtisuoraa elementtiä, jotka mittaavat magneettikentän kolmea komponenttia. Reikämagnetometrauksen suurimpia ongelmia on antureiden suuntaaminen, sillä reikä voi sijaita maan kentän suhteen missä asennossa tahansa. Tämän vuoksi koordinaatisto täytyy sijoittaa esimerkiksi maan painovoimakenttään ja tämän vaakasuoraan komponenttiin ja rakentaa tämä järjestelmä laitteeseen vakioksi. Mittauslaitteistolla kerätystä vektorisummasta saadaan tehtyä tietokonemalleja, jotka laskevat vektorikentän kyseisellä tutkimusalueella. [9].

2.4.2 Sähköiset reikämittaukset

Sähköisiä reikämittausmenetelmiä ovat omapotentiaalimittaus, ominaisvastusmittaus, latauspotentiaalimittaus, dipmeter-mittaus sekä indusoidun polarisaation mittaus. Omapotentiaalimittausta voidaan käyttää metallimalmineralisaatioiden paikallistamiseen sekä mahdollisten kiven rakoilu- ja vesivirtauskohtien paikallistamiseen. Mittauslaitteistolla mitataan jännitettä maan pinnalla ja reiässä olevan elektrodin välillä. Mittaus voidaan suorittaa myös kahdella reiässä olevalla elektrodilla jännite-eromittauksena, joka on edullista ympäristössä missä on paljon taustahäiriöitä. Omapotentiaalimittaus voidaan suorittaa samanaikaisesti myös ominaisvastus- ja indusoidun polarisaation mittauksen yhteydessä. [9].

Ominaisvastus on tavallisimmin kivistä mitattava sähköinen ominaisuus mittauksen ollessa suhteellisen yksinkertaista ja luotettavaa. Menetelmä perustuu sähkönjohtavuuden vaihteluihin kalliossa ja kallion raoissa. Myös rakojen vesitäyte näkyy tuloksissa. Ominaisvastus mitataan käyttämällä reikään ja maan pinnalle sijoitettuja virta- ja jännite-elektrodeja. Mittaustuloksista voidaan laskea kallion ominaisvastus, joka vastaa myös todellista in situ -arvoa mikäli kallio on homogeenista ja isotrooppista sekä reiän koko ja reiässä oleva veden johtavuus on otettu huomioon. Tuloksista voidaan myös laskea rako-
huokoisuutta tietyin oletuksin. [9].

Dipmeter-mittauslaitteisto on alunperin kehitetty öljynetsinnän tarpeisiin, mutta suuri-
kokoisista laitteista on kehitetty pienempiä versioita sopimaan pienempihalkaisijaisiin reikiin. Dipmeter-laitetta voidaan käyttää avoimien rakojen paikallistamiseen, rakoavoi-

muuden laadulliseen arvioimiseen, rakojen kaadesuunnan määrittämiseen ja reiän suunnan määrittämiseen. Dipmeter-anturissa on kaksi kaltevuusmittaria, kolme flux-gate -magnetometriä ja kolme tai neljä fokusoitua elektrodiä. Kaltevuusmittareilla saadaan mitatuksi anturin suunta ja referenssielektrodien suhteellinen asento sekä yhdessä magnetometrien kanssa käytettynä koko anturin asento. Näiden mittausten perusteella voidaan laskea reiän koordinaatit syvyyden funktiona. [9].

Indusoidun polarisaation mittauksella voidaan paikantaa metallisia mineralisaatioita sekä esimerkiksi savimineraalipitoisia vyöhykkeitä, jotka voivat olla myös ruhje- tai heikkousvyöhykkeitä. Menetelmää on käytetty lähinnä malminetsinnässä. Kivilajikoostumuksen määrittämisessä indusoidun polarisaation mittauksen on havaittu olevan soveltuva määrittäykseen, jotka muuten olisivat edellyttäneet laboratoriokokeita. [9].

2.4.3 Sähkömagneettiset reikämittaukset

Sähkömagneettisten reikämittausten käyttö on ollut pääasiallisesti malminetsinnän piirissä. Sillä on pyritty paikallistamaan hyvin sähköä johtavia ja suhteellisen suurimittakavaisia alueita. Käytettyjä sähkömagneettisia reikämittausmenetelmiä on pulssimenetelmät ja korkeataajuusalueella toimiva reikätkä. Reikätkämenetelmän periaatteena on sähkömagneettisen aaltojen heijastumisen ja vaimenemisen mittausreiässä tai kahden reiän välillä. Tämän menetelmän tavoitteena on paikantaa sähköä johtavia tai vesipitoisia vyöhykkeitä, mitkä voivat olla heikkous- tai mineralisaatiovyöhykkeitä. [9].

Reikätkämenetelmää on pääasiassa kehitetty yksireikämittauksiin sopivaksi. Tällöin sekä lähetin- että vastaanotinantennit ovat samassa reiässä. Sähköisiltä ominaisuuksiltaan poikkeavasta kohteesta heijastuvien aaltojen perusteella arvioidaan kohteen asentoa ja ominaisuuksia, kun parametreina ovat aaltojen kulkuaika ja amplituditaso. Menetelmällä on nähtävissä monipuolisia käyttömahdollisuuksia kalliorakentamiseen liittyvissä tutkimuksissa. [9].

2.4.4 Radiometriset reikämittaukset

Radiometrisissä reikämittausmenetelmissä mitataan porareistä radioaktiivista säteilyä. Säteily voi olla luonnollista tai keinotekoista, luonteeltaan gamma- tai neutronisäteilyä. Säteilyn intensiteetin ja energiatason perusteella voidaan arvioida kivilajiominaisuuksia, rakotäytyksiä sekä veden ominaisuuksia noin metrin säteellä mittauspisteestä. Eri menetelmien tavoitteet ja soveltuvuus poikkeavat toisistaan eri säteily- ja säteilylähdetyypeistä johtuen. [9].

Luonnollista gammasäteilyä voidaan mitata kallioperästä joko taustasäteilyn tai energiaspektrin muodossa. Rakenne- ja kivilajiominaisuuksien lisäksi tuloksista voidaan arvioida myös rakotäytteiden laatua. Spektrometrinen reikämittauksen vaikeudet liittyvät pienen kidekilavuuden aiheuttamaan mittauksen hitauteen. Mitattaessa keinotekoisesta gammalähteestä peräisin olevan säteilyn takaisinsirontaa kallioperästä, voidaan kallion rakennominaisuuksien lisäksi intensiteetistä arvioida materiaalin tiheyttä ja huokoisuutta sekä spektristä kyseisen kalliomassan koostumusta. Gamma-gamma -mittauksessa voidaan anturi kalibroida niin, että mittaustuloksena saadaan väliaineen tiheys gammalähteen ja ilmaisimen välissä. Normaalin tiheysvaihtelun lisäksi voi poikkeavat luotaustuloksen syy olla huokoisuudessa, sillä suuri huokoisuus sekä kiven rikkonaisuus pienentävät sen tiheyttä. [9].

Neutronisäteilyn takaisinsironnan mittauksessa käytetään keinotekoista neutronisäteilylähdettä, josta takaisinsironneen säteilyn intensiteetti riippuu kalliomassiivin vesi- ja vetypitoisuudesta. Menetelmä on käyttökelpoisin kun tutkitaan sedimenttikivien huokoisuutta ja veden suolaisuutta. Poikkeavia mittaustuloksia saadaan myös kiteisissä kivissä, kun väliaine sisältää runsaasti mafisia mineraaleja. Tällöin on mahdollista myös mineralogisten ja litologisten vaihtelujen seuraaminen.[9].

2.4.5 Seismiset reikämittaukset

Seismisten reikämittausmentelmien periaatteena on määrittää kiven elastisia ominaisuuksia seismisen aallon avulla. Mittaukset tapahtuvat lähettimen ja geofonin välillä ja ne voidaan tehdä joko reiästä reikään tapahtuvien mittauksin tai yksireikämittauksin. [9].

Yksireikämittauksessa mitataan seismisen aallon ominaisuuksia reiän syvyyden funktiona, jolloin sekä aaltolähde että ilmaisin lasketaan reikään. Mittausdatasta erotellaan nopeudet ja aaltomuodot. Kokemukseen perustuen voidaan sanoa, että rakovyöhykkeet vaikuttavat amplituditasoon herkemmin kuin etenemisnopeuteen. Yksireikämittauksen tutkimukset rajoittuvat reiän välittömään läheisyyteen muutaman kymmenen senttimetrin säteelle reiästä. Menetelmää käytetään, kun halutaan selvittää kallioperän todellisia ominaisuuksia jännitystilan alaisena tai kun tutkitaan rakoilun ja ruhjeisuuden määrää. Menetelmässä voidaan käyttää myös tekniikkaa, jossa luotaus tapahtuu reiästä maan pinnalle. Tällöin mahdollinen irtomaapeite saattaa kuitenkin heikentää saatavaa informaatiota oleellisesti. [9].

Kaksireikämenetelmän periaatteena on kartoittaa pitkittäisen ja poikittaisen aallon nopeusjakaumaa reikien välillä. Näiden avulla voidaan määrittää kallion kalliomekaanisia ominaisuuksia ja edelleen kallioperän epäjatkuvuuskohtia, kuten rakovyöhykkeiden ja kivilajikontaktien sijaintia ja yhteyksiä. Menetelmästä saatava informaatio ja tulokset korreloivat yksireikämenetelmän kanssa, ainoastaan tutkimusalue on huomattavasti suurempi. [9].

Akustiset reikämittaukset muistuttavat seismistä ja tutkamittausta. Taajuusalue on kuitenkin näistä poiketen ääni- tai ultraäänialueella. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kallion rakoilu- ja kimmo-ominaisuuksia. Laitteiston lähettimellä syötetään kallioon elastista aaltoa lyhyinä pulsseina, jotka vastaanotetaan ilmaisimilla. Vastaanotimesta lasketaan aaltojen kulku-aikaa signaalien aikaerosta. Aaltojen etenemiseen vaikuttavat kallion litologia, huokoisuus, rakoilu ja elastiset ominaisuudet. [9].

3. TUNNELILOUHINTASYKLI JA TUNNELINLOUHINTAKALUSTO

Tässä kappaleessa esitetään tunnelin rakentamisessa toistuvat työvaiheet sekä tunnelilouhinnassa käytettävää kalustoa. Esittelyn painopiste on työvaiheissa, joihin porauksen aikaisella mittauksella on selvää yhteyttä. Esimerkiksi porauksella ja lujituksella on läheisempi yhteys porauksenaikaiseen mittaukseen kuin lastauksella ja kuljetuksella.

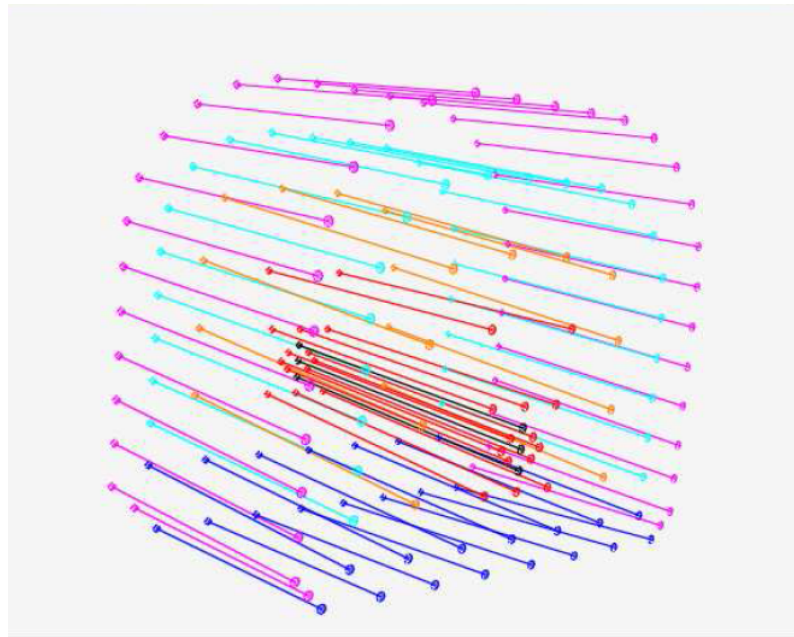
3.1 Poraus ja panostus

Tunnelilouhinnassa poraus ja panostus ovat kiven irrottamiseksi tehtäviä toistuvia perustoimia. Poraamisen avulla tehdään kalliomassan irrottamisen lisäksi kallion tiivistämistä ja lujittamista. Poraus on työvaihe, joka tuottaa kaiken MWD-datan analyysiä varten.

3.1.1 Poraus - tunnelilouhinnan perustyyppi

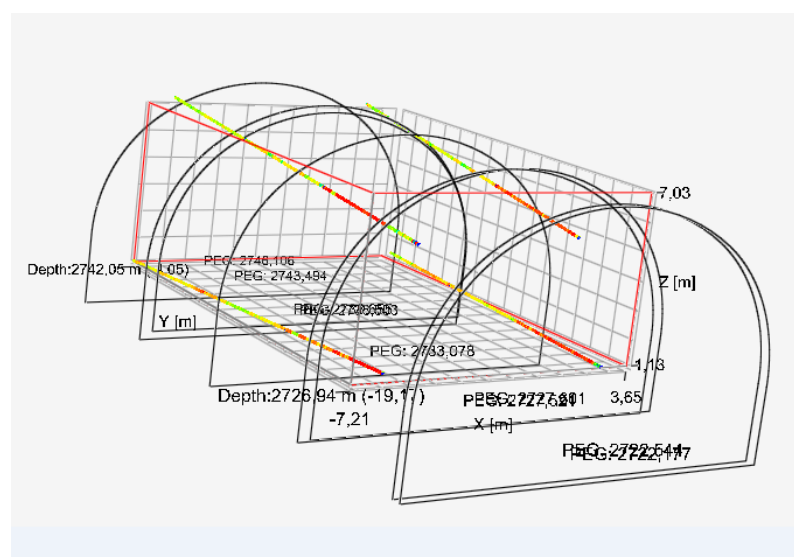
Kallion poraus on yksi tunnelilouhinnan perustoimia. Tässä kappaleessa käsitellään vain tunnelilouhinnassa esiintyviä poraustekniikoita, joita ovat katkon-, tunnustelu-, ja injektointiporaus sekä kalliopulttien poraus. Näissä poraustekniikoissa on tunnistettu analysoivalla porauksenaikaisella mittauksella olevan kehitysmahdollisuuksia.

Katkonporaus on porausta, jossa kalliota porataan sen irroitustarkoituksessa. Katkonporauksessa osa poratuista rei'istä panostetaan räjähdäaineilla, kun taas osa rei'istä jätetään panostamatta, jolloin niiden tarkoitus on toimia räjähdystapahtuman aiheuttaman rakoilun välittäjinä kalliomassassa. [12]. Kuvassa 3.1 on esitettynä Sandvik Mining and Construction Oy:n kehittämässä iSure-ohjelmistossa suunniteltu katkonporaus. Eri reikätyypit erottuvat eri väreillä kuvassa.



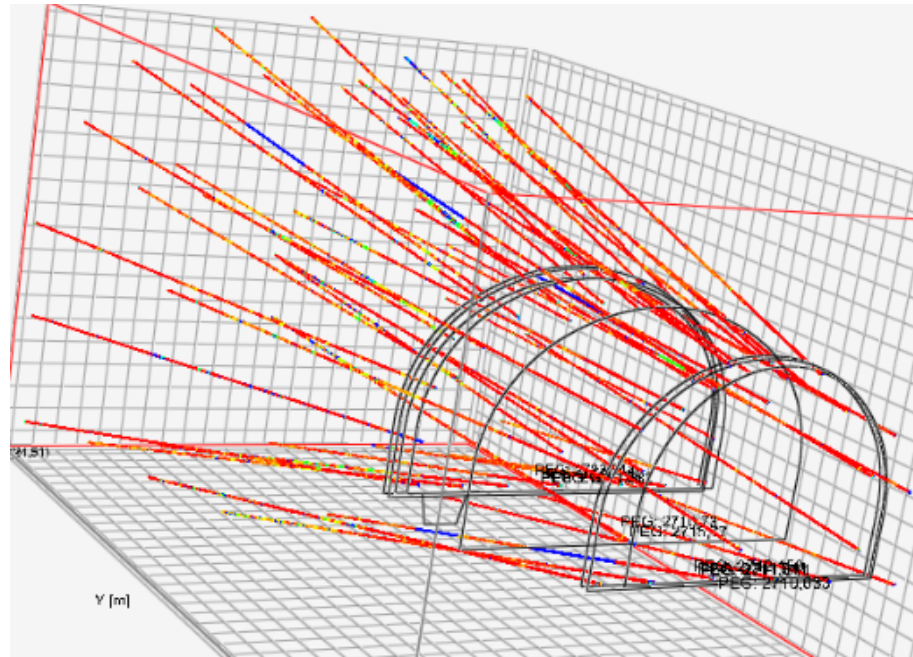
Kuva 3.1: 3D-kuva suunnitellusta katkonporauksesta iSure-ohjelmistossa. [13].

Tunnusteluporauksessa porataan noin 25 metrin pituisia reikiä tunneliprofiiliin siihen suuntaan, johon katkonporaus on etenemässä. Tällä porauksella saadaan tietoa louhittavasta kallion laadusta, kuten rakoilusta, ruhjevyyöhykkeistä ja vesiolosuhteista. Tunnusteluporausreikiä käytetään myös vesimenekikokeen tekemiseen, minkä mukaan määritetään kallion injektointitarve. Kuvassa 3.2 on esitettyä tunnusteluporaus ja sen suhde teoreettiseen tunneliprofiiliin. Kuvassa näkyviin reikiin on tehty MWD-analyysi.



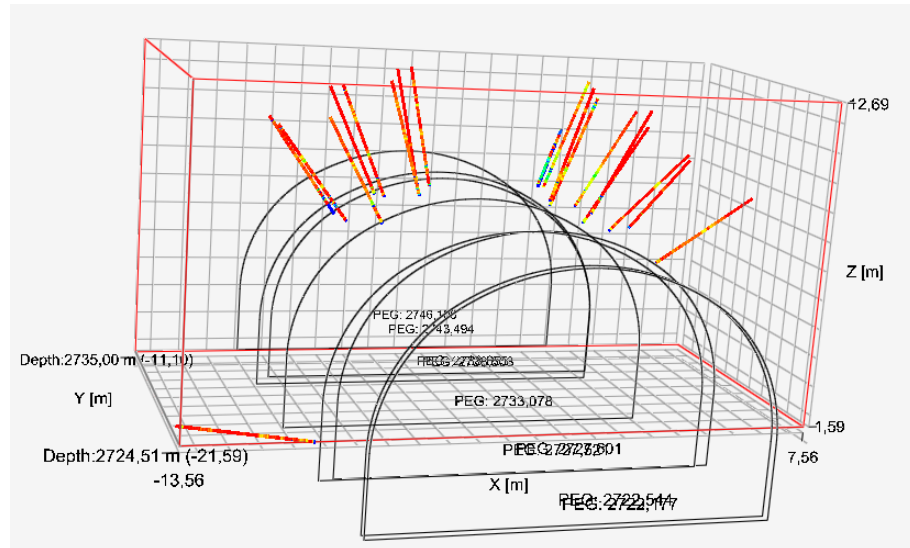
Kuva 3.2: 3D-kuva poratuista tunnustelurei'istä, joihin on tehty MWD-analyysi. [13].

Injektointiporauksessa porattavat reiät toimivat injektointimassan välittäjinä ympäröivään kallioon. Ne porataan viuhkamaisesti louhittavan tunneliprofiilin ympärille. Kuvassa 3.3 on esitettyä kaksi perättäistä injektointiporausta sekä teoreettinen tunneliprofiili. Kuvasta voidaan havaita hyvin se, kuinka paljon injektointiporauksen reiät ulottuvat teoreettisen tunneliprofiilin ulkopuolelle, joka mahdollistaa informaation keruun huomattavan paljon tunneliprofiilin ulkopuolella olevasta kalliomassasta.



Kuva 3.3: 3D-kuva poratuista injektointirei'istä, joihin on tehty MWD-analyysi. [13].

Pulttiporauksessa porataan tunneliprofiilista ulospäin reikiä, joihin asennetaan kalliopultteja kallion lujitustarkoituksessa. Pulttiporauksen reikämitta vaihtelee asennettavan pultin pituuden mukaan. Kuvassa 3.4 on esitettyä pulttien asennusta varten porattuja reikiä. Kuten kuvasta havaitaan, tarjoaa myös pulttiporauksesta tehty analyysi informaatiota juuri tunneliprofiilin ulkopuolisesta kalliomassasta.



Kuva 3.4: 3D-kuva poratuista pulttiporausreistä, joihin on tehty MWD-analyysi. [13].

Tunnelinporauksessa käytettävä porausmenetelmä on päältälyövää porausta. Päältälyövät porausmenetelmät sisältävät kolme peruskomponenttia, joita ovat porakone, porakalusto ja huuhtelujärjestelmä. Porausmenetelmältä edellytetään, että se rikkoo tehokkaasti kiveä ja poistaa rikutun kiviaineksen porareistä. Kiven rikkomiseen käytettävä energia muutetaan porakoneessa mekaaniseksi energiaksi, joka siirretään poratankojen välityksellä porakruunuun. Kallioon siirtyessään energia aiheuttaa kiviaineksen rikkoutumisen ja kruunun tunkeutumisen kallioon. Energiaa siirtyy iskun, pyörityksen ja syöttövoiman avulla. Porareissa rikutun kiviaineksen poistamiseen käytetään joko ilma- tai vesihuuhtelua. Kun päältälyövässä porauksessa iskuaalto saavuttaa porakruunun, energia siirtyy kiveen ja aiheuttaa terän tunkeutumisen ja kiven rikkoutumisen. [21]. Tärkeimmät porauksen porakruunun tunkeutumiseen vaikuttavat parametrit ovat

- iskutaajuus
- iskuetäisyys
- pyöritysnopeus
- syöttövoima
- huuhtelu

Laitekohtaisesti porakoneen iskun taajuuden ja energian muodostama iskuteho on suoraan verrannollinen porakoneen energianlähteenä käyttämän väliaineen paineeseen. Porakruunun tunkeutumisnopeus on puolestaan kivilajitekijöiden lisäksi suoran verrannollinen porakoneen iskutehoon. Syöttövoiman aikaansaamiseksi porakoneet varustetaan syöttölaitteella, joka aikaansaa reiän suuntaisen voiman hydraulisesti tai mekaanisesti. Syöttövoima

on muutettavissa kivilaadun ominaisuuksien mukaan. Porakruunun tunkeutuvuus kasvaa tiettyyn syöttövoimaan asti, jonka jälkeen lisätty syöttövoima ei lisää tunkeutumismnopeutta. [21]. Kuvassa 3.5 on Sandvik Mining and Construction Oy:n valmistama porakone Sandvik RD525, joka toimii porakoneena useissa uusimmissa tunnelijumboissa.



Kuva 3.5: Sandvik RD525 porakone. [14].

Pyörittämisen tehtävänä on kääntää porakruunu jokaista iskua varten uuteen asentoon jotta se voisi jatkuvasti rikkoa kalliota reiän pohjalta. Pyörittämissnopeudella on kivilajista ja muista porausparametreista riippuva optimiarvo. Optimiarvon yläpuolella tunkeutumismnopeus laskee ja alapuolella hukataan energiaa ja porauskaluston kuluminen lisääntyy. [21].

Huuhtelun tarkoituksena on poistaa porauksessa syntynyt kiviaines reiästä. On epätaloudellista jauhaa porausjätettä tarpeettoman usein porakruunun välityksellä. Mikäli huuhtelu on riittämätöntä, porakruunun tunkeutumismnopeus laskee. Huuhteluun käytettävä ilma tai vesi johdetaan poratankojen ja porakruunun huuhtelureikiä pitkin porareian pohjalle, josta se kuljettaa irroitettua kiviaineksen poratankojen ja porareian seinän välistä tilaa pitkin ulos. [21].

3.1.2 Panostus

Porauskaavion mukaan poratut reiät panostetaan räjähdaineella kalliomassan irrottamiseksi. Tunneliräjäytyksessä käytetään kohtuullisen suurta ominaispanostusta ja -poraus, sillä räjäytyksen alkaessa tunnelissa on vain yksi purkautumissuunta. Avausreiät panostetaan suurella panostusasteella, eli ne panostetaan yleensä täyteen ANFOa tai emulsioräjähdainetta. Myös pohjareikien panostus tehdään suurella panostusasteella, sillä niiden

tulee räjähtäessään nostaa muiden reikien rikkomaa kalliota ja rikkoa reikiä ympäröivää kalliota. Louhittavan tunnelin seinän ja katon reiät panostetaan yleensä pienellä panostusteella, sillä niiden ei tarvitse räjähtäessään kuin irrottaa kalliomassa, joka painovoimaisesti tippuu alas. [3].

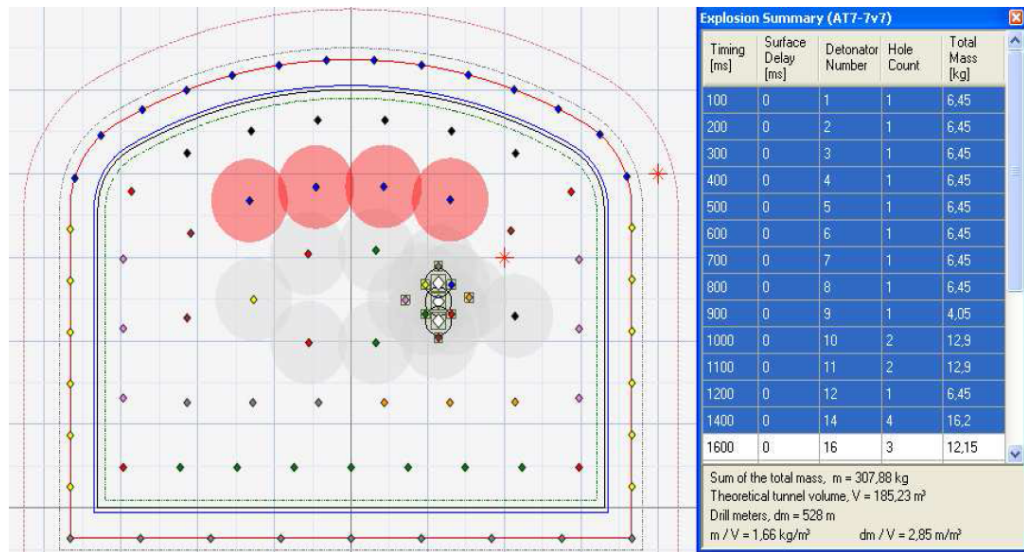
Porauksenaikaisella mittauksella ei ole suoranaisesti vaikutusta tunnelilouhinnan panostukseen. Porauksella ja sen suunnittelulla sen sijaan on oleellinen vaikutus räjäytyksen onnistumisessa, sillä väärin suunniteltua tai huonosti toteutettua porausta ei voida räjähdaineilla parantaa. Tämän vuoksi porattavat reiät on suunnattava tarkasti ja ne on aloitettava oikeista paikoista.

3.2 Räjäytys ja tuuletus

Räjäytys ja tuuletus ovat porauksen ja panostuksen ohella tunnelilouhinnan perustapahtumia. Räjähdystapahtuman tarkoituksena on kalliomassan irrottaminen teoreettisen tunneliprofilin saavuttamiseksi. Tuuletuksen tarkoituksena on räjähdystapahtumassa syntyvien kaasujen poisto tunnelista ja näin työskentelyn mahdollistaminen tunnelissa.

3.2.1 Räjäytys - kalliota irrottava tapahtuma

Kallion räjäytystä suunniteltaessa pyritään siihen, että jokaisella räjähtävällä reiällä on vapaa purkautumissuunta. Tämä mahdollistetaan porauskaavion suunnittelulla sekä räjäytystapahtuman hidastamisella eri reikien välillä. Avauksen räjäyttämässä hidastuksen eri reikien välillä pitää olla niin suuri, että kalliomassa irtaantuu ja lentää ulos riittävän matkan, jolloin vapaata tilaa seuraavalle räjähdystapahtumalle muodostuu. Avausreikiin käytetään yleensä ilman hidasteella toimivaa nallia, joka mahdollistaa seuraavien reikien räjähdykselle purkautumistilaa räjähdystapahtumaan, kun niissä käytetään hidastettuja nalleja. Katto- ja seinäreiät pyritään räjäyttämään mahdollisimman yhtäaikaaisesti avausreikien räjähdysten jälkeen, mikäli tärinärajoitukset sen mahdollistavat. Pohjareiät räjäytetään yleensä toiseksi viimeisenä ja pohjan ja seinien yhtymäpaikan nurkkareiät räjäytetään viimeisenä. [3]. Kuvassa 3.6 on iSure-ohjelmistolla tehty porauskaavion mukainen räjäytyssuunnitelma, missä esimerkiksi avauskuvio on keskellä salmiakin muotoisina symboleina. Kuvan oikean reunan taulukossa on tietoja räjäytettävästä katkosta, kuten poratut porametrit, nallien hidasteajat, käytettävä räjähdemäärä reikää kohti sekä katkon teoreettinen tilavuus.



Kuva 3.6: iSure-ohjelmistolla tehty porauskaavion mukainen räjäytys suunnitelma. [15].

Porauksenaikaisella mittauksella ei ole suoraa yhteyttä räjäytystapahtumaan, vaan siihen voidaan vaikuttaa käytännössä vain onnistuneella porauskaavion suunnittelulla ja edelleen onnistuneella porauksen toteutuksella sekä panostuksen ja sytytysjärjestyksen optimoinnilla. Porauksenaikaisella mittauksella voidaan kuitenkin mahdollisesti optimoida poraus- ja panostussuunnittelua kalliomassan ominaisuuksien mukaan, milloin välillinen vaikutus räjäytystapahtuman onnistumiseen on olemassa.

3.2.2 Tuuletus - räjähdyskaasujen poistamiseksi

Louhintatöistä poraus, räjäytys, lastaus ja kuljetus synnyttävät kivipölyä ja erilaisia kaasuja, jotka saastuttavat ilmaa. Maanalaisessa louhintatyössä ilman pilaantumiseen joudutaan kiinnittämään erityistä huomiota sillä luonnollinen tuuletus on harvoin riittävää. Erityisesti räjäytys ja lastaus- ja kuljetustyöt synnyttävät kivipölyä, joista esimerkiksi kvartsi- ja asbestipölyt saattavat aiheuttaa vakavia sairauksia. Pöly pyritään tunnelissa aina sitomaan tai erottamaan sopivalla laitteistolla ja sen pitoisuutta tarkkaillaan. [4].

Räjäytyksessä syntyy räjähdyskaasuja, joista vaarallisimpia ovat hiilen, typen ja rikin oksidit. Mikäli palaminen on epätäydellistä, syntyy hyvin myrkyllistä hääkäasua. Myös hiilidioksidi on korkeana pitoisuutena vaarallista, mutta pitoisuuden raja-arvon ylitys on melko harvinaista. [4].

Edellämainituista syistä on kalliotilaa louhittaessa tuuletus hoidettava hyvin. Mikäli halutaan erittäin tehokas tuuletus, voidaan käyttää yhdistettyä imu- ja puhallustuuletusta. Tällöin heti räjäytyksen jälkeen imetään pölyä ja kaasuja pois tunnelin perästä ja samanaikaisesti tilalle puhalletaan puhdasta ilmaa. Tällöin myös tuuletuksen odotusaika lyhenee huomattavasti, kun pöly- ja kaasumäärät eivät ole esteenä työskentelylle. [4].

3.3 Lastaus ja kuljetus

Lastauksen ja kuljetuksen tarkoituksena on saada räjäytetty kalliokiviaines mahdollisimman nopeasti pois tunnelista jatkokäyttöä varten. Nämä toimenpiteet suoritetaan välittömästi räjäytyksen jälkeisen tuuletuksen jälkeen, milloin myös räjäytetyn katkon katto ja seinät rusnataan, eli niistä poistetaan irtonaisesti tai löyhästi kiinni olevat lohkat. Ennen irrotetun louheen kuormaamista louhe voidaan myös kastella pölyämisen estämiseksi. [3]. Porauksenaikaisella mittauksella ei ole suoranaista vaikutusta lastaukseen tai kuljetukseen, mutta mikäli MWD-analyysillä voidaan vaikuttaa esimerkiksi räjäytyksen onnistumiseen ja edelleen irrotetun louheen lohkatkoon optimointiin, voi se helpottaa lastaamista.

3.4 Tiivistys ja lujitus

Kallion tiivistämisen tarkoituksena on estää pohjavesivuotojen pääsy tunneliin. Yleisin tapa tunnelin tiivistämiseksi on porata tunneliprofiilin ulkopuolelle reikiä, joihin edelleen pumpataan sementin ja veden seosta. Tätä menetelmää kutsutaan injektoinniksi. Kallion lujittaminen on kalliomassan vahvistamista esimerkiksi kalliopultteja käyttämällä. Lujituksella varmistetaan kalliotilan tarpeen mukainen pysyvyys halutulla aikajänteellä.

3.4.1 Injektoinnin periaatteet ja menetelmä

Injektoinnilla tarkoitetaan kalliorakentamisessa työmenetelmää, jossa kalliossa oleviin rakoihin pumpataan paineella täyteainetta. Injektoinnin tarkoituksena on kallion tiivistäminen tai lujittaminen. Injektoinnilla voidaan myös parantaa kallion ja mahdollisen betonirakenteen yhteistoimintaa. [12]. Injektointiin ryhdytään esimerkiksi seuraavista syistä

- vuotovesimäärät ovat niin suuret, että ne vaikeuttavat louhintaa
- pumppauskustannukset nousevat liian suuriksi
- vesivuodot huuhtelevat pois rakotäytteen ja näin aiheuttaa kallion heikkenemistä
- vuotovesi vaikeuttaa kalliotilan käyttöä

- vuotovedet aiheuttavat haitallista pohjavedenpinnan alenemista kalliotilan yläpuolella

Kalliotilarakentamisessa käytetään yleisimmin esi- tai jälki-injektointia, jotka kuvaavat sitä, tehdäänkö injektointi ennen injektoitavan katkon räjäytystä vai sen jälkeen. Yleisimmin käytetty menetelmä on esi-injektointi. Kallion injektointitarve voidaan etukäteen määrätä esimerkiksi syväkairausten ja vesimenekikokeen perusteella. Jälki-injektoinnin tarve määritellään silmämääraisten havaintojen ja vesimenekikokeen perusteella sekä mittapatojen avulla tehtävien vuotovesimitausten perusteella. [12].

Injektointi on jaettu injektointitarpeen vaativuuden perusteella neljään vesitiiveysluokkaan, jotka ovat AA, A, B ja C. Tiiveysluokka AA käsittää erittäin vaativat kohteet kuten keskustarakentaminen ja ydinpolttoaineen loppusijoituksen. Ympäristövaatimuksiltaan luokka AA on erittäin vaativa ja sallittu pohjaveden virtaus tunneliin on noin 1-2 l/min/100m. Tiiveysluokka A käsittää normaalin kalliorakentamisen kuten kaupunkialueet. Ympäristövaatimuksiltaan luokka A on normaali ja sallittu pohjaveden virtaus tunneliin on noin 5 l/min/100m. Tiiveysluokka B käsittää kalliorakentamisen, jossa pienet vesivuodot eivät aiheuta ongelmia. Ympäristövaatimuksiltaan luokka B on pieni ja sallittu pohjaveden virtaus tunneliin on noin 10 l/min/100m. Tiiveysluokka C käsittää kohteet, joissa pyritään voimakkaiden vesivuotojen vähentämiseen esimerkiksi kaivoksissa. Ympäristövaatimuksiltaan luokka C on vähäinen ja sallittu pohjaveden virtaus tunneliin on noin 40-50 l/min/100m. Edellämainituissa tiiveysluokissa esitetyt pohjaveden virtausmäärät ovat kuitenkin suuntaa antavia ja niistä voidaan poiketa luotettavien selvitysten perusteella. [20]

Ennen injektointityön aloittamista on injektointitöistä vastaavan työnjohtajan toimitettava suunnittelijalle yksityiskohtainen työohjelma, joka vaaditaan luokissa AA ja A. Työohjelma laaditaan työselostuksen ja suunnittelijan ohjeiden perusteella. Injektointityö sitoo yleensä kaksi työntekijää niin porausvaiheessa kuin injektointityössäkin. Porausvaiheessa tarvitaan porari sekä porakangen vaihtaja ja injektointityössä toinen työntekijä hoitaa sekoituslaitteistoa toisen säätäessä ja seuratessa injektointipainetta ja virtausta. [20].

Injektointityö aloitetaan poraamalla tunnustelureiät, joiden määrä riippuu vaaditusta tiiveysluokasta ja katkon poikkileikkauksen pinta-alasta. Tunnustelureiät voidaan porata injektointikaavion mukaan, jolloin niitä voidaan käyttää injektointireikinä. Tunnustelureiiden sopiva pituus on sama kuin injektointirei'illä. Tunnustelureikiä poratessa on porauslomakkeeseen merkittävä reikäkohtaisesti ainakin huuhteluveden väri, porarin havaitsemat heikkousvyöhykkeet ja raot, lusta-automaatiikan toiminta sekä muutokset tunkeumanopeudessa. Tiiveysluokassa AA on myös käytettävä datarekisteröintiä injektointimassan mittauksessa. Mikäli injektointia ei tarvita ja tunnustelureikä on tunnelin teoreettisen reu-

nan ulkopuolella, reikä täytetään laastilla. Tunnustelurei'issä mitataan tunneliin virtaava vesimäärä tai siinä tehdään vesimenekikoe, jonka perusteella injektointitarve arvioidaan vaadittavan tiiveysluokan mukaan. [20].

Injektointireikiä poratessa porauslomakkeeseen merkitään samat porausenaikaiset havainnot kuin tunnustelureikien porauksessa ja lisäksi vielä porareian numero, pituus ja halkaisija. Poratut injektointireiät on myös huuhdeltava. Tiiveysluokissa A, B ja C huuhtelu tehdään porauksen yhteydessä ja tiiveysluokassa AA käytetään lisäksi vielä korkeapaineista vesisuihkua tai vastaavaa yhtä tehokasta huuhtelumenetelmää. Ilmahuuhtelua tulee välttää muissa luokissa kuin C, mutta esimerkiksi olosuhteiden tai muiden kohtuuttomasti vesihuuhtelua vaikeuttavien syiden vuoksi se voidaan sallia muissakin luokissa. [20].

Injektointireikien ollessa porattuna, asetetaan kaikkiin injektoitaviin reikiin noin 1,5-2m pituiset mansetit, jotka asennetaan noin 1-1,5m syvyydelle. Injektointireiät merkataan porauskaavion mukaisin numeroin tai merkinnöin spraymaalilla. Mansettien tulee olla riittävän tiukalle kiristettyjä, jotta mansetit pysyvät rei'issä injektointipaineesta huolimatta. Injektointi suositellaan aloitettavan alimmista rei'istä etenemällä ylöspäin perän molemmin puolin, poislukien voimakkaasti vuotavat reiät, jotka voidaan injektoida ensin. Useamman reiän yhtäaikainen injektointi on mahdollista, mikäli injektointipaine ja virtaus on mitattavissa reikäkohtaisesti. [20].

3.4.2 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonointi on kalliorakentamisessa menetelmä, jossa betoni ruiskutetaan paineilman avulla kalliota vasten. Ruiskubetonointi voidaan suorittaa kuivamenetelmällä tai märkäruiskutuksella. Kuivamenetelmässä ruiskusta lähtee paineilman kuljettamana letkua myöten runkoaineen ja sementin seos. Vesi lisätään seokseen vasta suuttimessa. Märkäruiskutuksessa valmis betoniseos pumpataan letkua pitkin ruiskutuskohteeseen. Suuttimeen johdetaan paineilmaa, joka ruiskuttaa betonin kohteeseensa. Suuttimessa betoniin lisätään myös betonin sitomista kiihdyttävää lisäainetta. Nykyään ruiskubetonin lujitusainena käytetään teräs-, muovi- tai lasikuituja, jolla parannetaan betonin veto- ja iskulujuutta. [21].

Ruiskubetonoinnin työsuoritus aloitetaan puhdistamalla ruiskutettava pinta pölystä ja muusta irtonaisesta aineksesta, sillä ruiskubetonoinnin tartuntalujuus edellyttää puhdasta tartuntapintaa. Puhdistus suoritetaan joko voimakasta vesi- tai vesi-paineilmasuihkua käyttäen. Käytettäessä kuivamenetelmää ruiskutus on tehtävä niin ohuina kerroksina ettei betonikerros irtaannu pinnasta. Lisäainetta käyttämällä voidaan kerrospaksuutta kasvattaa.

Hukkaroiskeella, jota voi olla 15-40% on suuri vaikutus ruiskubetonoinnin kustannuksiin. Hukkaroiskeen vähentämiseksi tulisi ruiskutus tehdä mahdollisimman paksuina kerroksina sekä oikealla ruiskutustekniikalla. Oikea tekniikka tarkoittaa oikeata ruiskutusetäisyyttä ja -kulmaa. [21].

3.4.3 Kalliopultit

Kalliomassan pultitus on yksi yleisimmistä kallion lujitusmenetelmistä. Se on myös suhteellisen halpa ja yksinkertainen menetelmä. Pultituksen tarkoituksena on rajoittaa siirtymiä kalliomassassa ja pitää kallion lohkareita paikallaan eli parantaa kallion kykyä tukea itseään ja sietää rasituksia. [22].

Kalliomassan lujitustarve on yleensä määritelty rakennussuunnitelmissa. Lujitustarpeeseen vaikuttaa myös louhittavan tilan käyttötarkoitus. Kalliotilan lujitusmäärissä on eroavaisuuksia, kun kyseessä on esimerkiksi liikennetunneli tai maanalainen varastotila. Yleensä kalliotilarakentamisessa suoritettavassa louhinnassa käytetään sekä väliaikaista että pysyvää pultitusta. Tämä vaihtelee hankekohtaisesti sen mukaan, kuinka paljon resursseja on käytettävissä ja minkälaiset olosuhteet kalliomassassa vallitsevat. [22].

Käytettävien kalliopulttien pituudet voivat vaihdella hyvin paljon riippuen louhittavan tilan suuruudesta, sillä se vaikuttaa suurimpaan mahdollisimpaan asennuspituuteen. Myös pulttityyppi vaikuttaa pulttipituuden valintaan. Kalliotilarakentamisessa käytettäviä pulttityyppejä on saatavilla laaja valikoima. Pultit jaetaan yleensä karkeasti sen mukaan miten ne käyttäytyvät kalliossa. Pultit jaetaan pääkategorioittain juotettuihin, ankkuroituihin ja kitkapultteihin. Näiden kategorioiden alla on vielä laaja skaala erilaisia pulttivaihtoehtoja. Pultit voidaan asentaa myös jännittämättöminä tai esijännitettyinä. Pultit voivat olla joustamattomia teräspultteja tai joustavia vaijeripultteja, jotka mahdollistavat suhteellisen suuret asennuspituudet. [22].

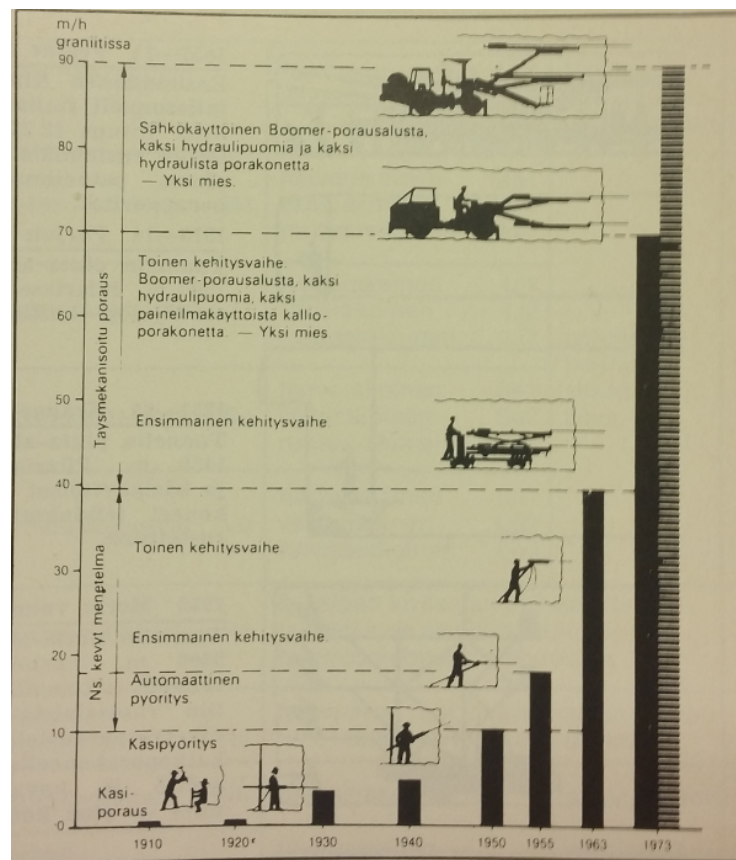
Porauksenaikaisen mittauksen pyrkimyksenä on lujitustarpeen määrittäminen poratun kalliomassan ominaisuuksien mukaan ja pulttiporauksen hyödyntäminen kalliomassan ominaisuuksien tarkastelussa. Pulttiporaus suuntautuu muuhun kallioporaukseen nähden suuntaan, jolla voidaan saada esimerkiksi rakoilusta huomattavaa lisäinformaatiota.

3.5 Tunnelilouhintakalusto

Tässä kappaleessa esitetään tunnelilouhinnassa yleisesti käytössä olevia laitteita. Laitteista esitellään myös niiden käyttötarkoitus tunnelilouhintasyklin aikana. Ohjelmistoista esitellään Sandvik Mining and Construction Oy:n kehittämä iSure -ohjelmisto.

3.5.1 Porauslaitteet

Kallionporauslaitteet ovat kehittyneet viime vuosisadan aikana suurin askelin. 1900-luvun alussa kallion poraaminen suoritettiin vielä täysin manuaalisesti. Vielä 1950-luvulla käytetyillä yhden miehen kannattelemissa porakoneilla päästiin vain noin 10 metrin tuntivauhtiin porausnopeudessa. Tämän jälkeen kehitysaskleet ovat kuitenkin olleet huomattavasti suurempia. Yhden miehen kannattelemaat poralaitteet ovat vaihtuneet pyöräalustaisiin poralaitteisiin eli tunnelijumboihin, jotka kantavat porakoneen ja syöttölaitteen sekä näihin liittyvät komponentit. Tunnelijumbojen ohjaus voidaan suorittaa myös kauko-ohjatusti, mikä mahdollistaa useamman perän yhtäaikaista poraamista. [24]. Kuvassa 3.7 on esitettyä tunneliporaustekniikan kehitystä viime vuosisadan aikana porausnopeuden suhteen.



Kuva 3.7: Tunneliporaustekniikan kehitys 1900-luvulla [24].

Yksi suurimmista tunnelijumbojen kehitysaskelista on ollut niiden energiansiirrossa käytettävän väliaineen vaihtuminen ilmasta öljyksi, eli pneumaattinen päältälyövä poraus on vaihtunut hydrauliseksi päältälyöväksi poraukseksi. Hydrauliikan käyttö on mahdollistanut tehonsiirron sekä voimien ja väännön säädön järjestämisen tarkasti, mikä on lisännyt huomattavasti nykyisten kallioporauslaitteiden automatisointia ja mekanisointia. Pneumatiikan käytön vaihto hydrauliikkaan on vähentänyt myös poralaitteiden tuotantokustannuksia energiayksikköä kohti sekä porakalustokustannuksia. [24].

Nykyaikaisen tunnelijumbon pääkomponentit ovat alusta renkaineen ja jalkoineen, hytti, puomit ja porakoneet sekä näitä yhdistävät letkut, kaapelit, anturit ja poransyöttölaite. Puomien määrä voi vaihdella yhdestä neljään tunnelijumbon koon ja käyttötarkoituksen mukaan. Kuvassa 3.8 on Sandvik Mining and Construction Oy:n valmistama täysautomatisoitu porajumbo.



Kuva 3.8: Sandvik Mining and Construction Oy:n valmistama DT921i -porajumbo [16].

Porajumbot ovat nykyisin varustettu myös väyläohjausjärjestelmällä, joka mahdollistaa huomattavasti pienemmän määrän sähköjohtoja, kun sitä verrataan vanhanaikaisiin järjestelmiin. Väyläohjaus mahdollistaa myös porajumbon eri järjestelmien helpomman laajennettavuuden ja automaatiomahdollisuudet, mikä toimii myös alustana MWD-järjestelmien kehittämiselle. [19].

Tunnelinporauslaitteita on saatavilla erilaisilla porausautomaatioasteilla. Yksinkertaisimmilla laitteilla porari suorittaa katkonporauksen käsikäyttöisesti eli poraa ja siirtää puomit käsikäyttöisesti. Täysautomatisoiduissa laitteissa kone suorittaa poraamisen ja puomien siirron täysin automaattisesti. Täysautomatisoiduilla laitteilla on myös mahdollista käyttää manuaalisesti. Osittain ja kokonaan automatisoituja laitteita käytettäessä porauskaaviot suunnitellaan siihen kehitetyllä ohjelmistolla työmaatoimistossa tietokoneel-

la, josta ne viedään sähköisesti poralaitteelle. Poralaite hyödyntää suunnitellun kaavion informaatiota porauksen suuntaamisessa ja puomin liikuttelussa. Kaavionsuunnitteluohjelmat myös optimoivat porausjärjestyksen, jolloin puomia liikutetaan mahdollisimman vähän.[3].

3.5.2 Muut tunnelilouhinnassa käytettävät laitteet

Porauslaitteiden lisäksi tunnelilouhinnassa on käytössä monia muita laitteita, joilla on oma tehtävänsä tunnelilouhintasyklin eri vaiheissa. Käytettävä kalusto ja sen määrä vaihtelee myös hankekohtaisesti. Kaluston koon valintaan vaikuttaa luonnollisesti louhittavan tilan koko, joka määrittää paljolti käytettävän kaluston koon rajoitteet. Käytettävä kalusto esitellään sen esiintymisjärjestyksen mukaan tunnelilouhintasyklissä.

Ennen poraamisen aloittamista poralaite navigoidaan paikalleen käyttämällä esimerkiksi takymetriä. Poralaitteen asemointi oikealle paikalleen on tärkeää, jotta suunnitellun tunneliprofiilin louhinta onnistuu.

Mittaamisen jälkeen poralaite aloittaa poraustyön. Ensimmäisenä porataan tunnustelu-reiät, joihin tehdään vesimenekkikoe. Vesimenekkikokeen kalustoon kuuluu pumppu, letkut, painemittari ja mansetit, joilla veden pumppausta kallioon säädetään eri osuuksille. Vesimenekkikokeen tarkoituksena on mitata tunnustelureikiin pumpattavan veden määrää ja painetta, minkä perusteella tehdään päätös injektoinnista. [20].

Mikäli vesimenekkikokeen perusteella tehdään päätös injektoinnista, tarvitaan injektointikalustoa. Injektointikalustoon kuuluu sekoittajan vedenannostusjärjestelmä, sekoitin, välihämmennin, pumppu, virtauksen sekä paineen mittalaitteet ja mansetti. [20]. Isoimmat injektointikalustot ovat tehty esimerkiksi kuorma-auton alustalle, jossa on omat sementtisiilonsa, mutta myös kevyempiä kalustoja on käytössä. Yleensä injektointiin tarvitaan käyttöön myös mahdollisesti porajumbossa oleva nostokori, jolla päästään suorittamaan injektointia koko tunneliprofiiliin.

Injektoinnin jälkeen tunneliprofiiliin suoritetaan katkonporaus, joka on panostusta edeltävä työvaihe. Panostuksessa käytettävä kalusto riippuu käytettävästä räjähddeaineesta. Mikäli panostettava räjähddeaine on mahdollista pumpata reikiin, käytetään kalustoa, jossa on räjähddeainesäiliö ja pumppu sekä letkut, joilla räjähddeaine johdetaan reikään. Muuten panostus suoritetaan manuaalisesti, kuten myös panostuksessa käytettävien nallien asennus.

Panostuksen jälkeen katko räjäytetään ja suoritetaan tuuletus. Tuuletusta varten käytetään siihen tehtyjä puhaltimia ja putkituksia, joilla räjähdystapahtumassa muodostuneet kaa-

sut johdetaan pois tunnelista. [4]. Tuuletuksen jälkeen irrotettu louhe kuormataan käyttämällä pyöräkuormaajaa tai maanalaisiin tiloihin suunniteltua kuormauskalustoa. Louheen kuljetus suoritetaan käyttämällä kuorma-autoja tai maanalaisiin tiloihin suunniteltua kuljetuskalustoa. [3]. Maanalaisiin tiloihin suunniteltujen kuormaus- ja kuljetuslaitteiden yhteisnimitys on LHD-laitteet.

Louheen uloskuljetuksen jälkeen tunnelin seinät ja katto rusnataan. Rusnausta varten käytetään yleensä normaalia kaivinkonetta, joka on varustettu rusnaukseen käytettävällä laitteella kynnellä, joka on kauhan tilalla. Rusnausta voidaan suorittaa myös käsin, jolloin käytössä on porajumbon nostokori, josta irtonaisia lohkareita pyritään kankeamaan käsin irti. Työturvallisuuden vuoksi kuitenkin käytössä on yleisimmin koneellinen rusnaus.

Rusnauksen jälkeen räjäytetyn katkon sisäpinta pestään ja tehdään mahdolliset lujitustoimenpiteet. Käytettävien kalliopulttien vaatimat reiät porataan yleensä porajumbolla, jolla porataan muutkin tunnelilouhinnassa porattavat reiät. Pulttien asennus voidaan suorittaa niin manuaalisesti kuin mekanisoidustikin. Manuaalisessa asennuksessa käytetään porajumbon nostokoria, mutta mekanisoidussa asennuksessa voidaan käyttää pultitusta varten tehtyjä laitteita. Täysin mekanisoidussa pultituksessa käytettävä laitteisto suorittaa myös pulttien vaatimien reikien porauksen sekä asennuksen. [22]. Täysin automatisoituja pultituslaitteita valmistaa myös Sandvik Mining and Construction Oy ja ne ovat Sandvik DS-sarjan laitteita.

Lujitustoimenpiteistä ruiskubetonointi suoritetaan yleensä siihen kehitetyllä ruiskubetonointiautolla, joka sisältää sementtisäiliön, sekoittimen sekä pumpun betonin ruiskuttamiseen. Ruiskubetonoinnin apuna voidaan käyttää myös porajumbon nostokoria, jotta betonointi saadaan suoritetuksi kauttaaltaan tunneliprofiiliin. [21]. Ruiskubetonointiin on myös käytettävissä nostopuomin sisältäviä kalustoja, jotka eivät tällöin sido porajumboa käytettäväksi tähän työvaiheeseen.

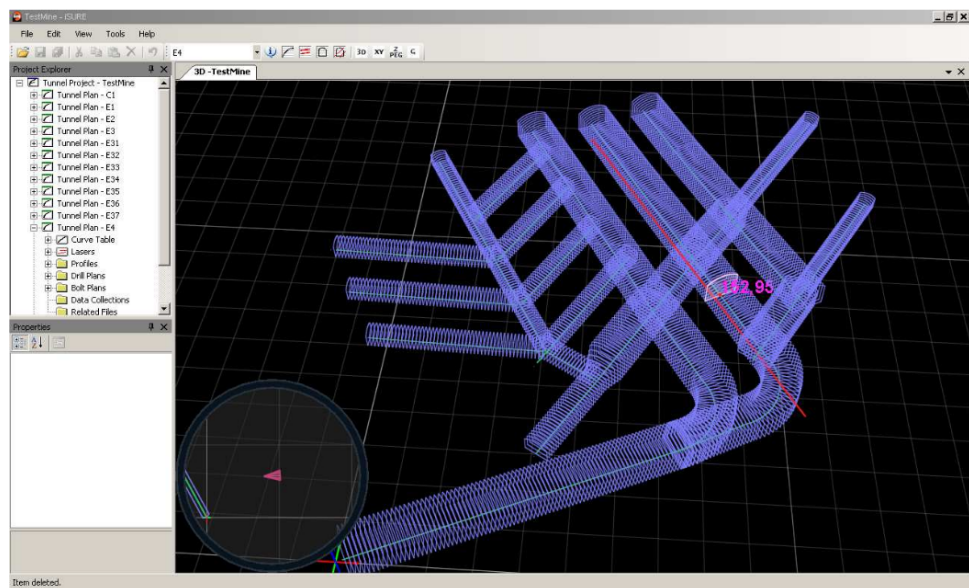
3.5.3 Louhinnan tukena käytettävät ohjelmistot

Louhinnan tueksi on kehitetty ohjelmistoja, joilla pystytään hoitamaan esimerkiksi porauksen asettamia vaatimuksia suunnittelutyössä. Sandvik Mining and Construction Oy:n kehittämä sovellus porauskaavioiden suunnitteluun, porauksen raportointiin ja porausdatan analysointiin on nimeltään iSure (intelligent Sandvik Underground Rock Excavation). iSure-ohjelmistoa on saatavana neljänä eri moduulina, jotka ovat iSure Tunnel, iSure Report, iSure Analysis ja iSure Bolting. iSure Tunnel moduuli sisältää tunnelisuunnitelman suunnittelun, porauksen ja panostuksen suunnittelun, porauskaavion suunnittelun ja pitkäreikäporauksen kaavion suunnittelun työkalut sekä tunnelin linjan ja projektin tiedostot.

iSure Report moduuli tukee Tunnel moduulin raportointia, mutta siinä on lisäksi lähtevyyssanalyysi porauksen optimoinnin ja prosessin kehittämisen tueksi. iSure Analysis moduuli lisää edellisiin moduuleihin MWD-analyysin datankeruu ja raportoinnin kalliomassan rakenteen ja ominaisuuksien analysoitavaksi. iSure Bolting moduuli tukee edellisiä moduuleja pultituksen suunnittelulla. [15].

iSure-ohjelmiston avulla voidaan suunnitella yksittäisiä tunneleita tai kokonaisia tunnelistoja käsittäen useita tunneleita. Ohjelmistolla voidaan suunnitella lisäksi näihin liittyvät tunneliprofiilit, poraus- ja pulttaускаaviot, laserit ja esitäytetyt navigoinnit. Ohjelmiston avulla tehdyistä suunnitelmista voidaan muodostaa tiedostot i-sarjan tunnelijumboille, jotka käyttävät suunniteltua aineistoa porauksen ohjauksessa. [15].

iSure-ohjelmistolla luotava tunnelisuunnitelma vastaa tunnelia, joka sisältää yhden kaarretaulukon ja siihen liitetyt profiilit ja porauskaaviot. Tunnelisuunnitelma sisältää kaiken oleellisen informaation louhittavasta tunnelista yhdessä suunnitelma-aineistossa yhdistettynä määritettyyn koordinaatistoon. Tunnelisuunnitelma voidaan edelleen esittää graafisesti ja sitä voidaan tarkastella 3D-ikkunassa. Tunnelisuunnitelma voidaan viedä edelleen porauslaitteelle, jolloin kaikki tunnelisuunnitelmaan liittyvät porauskaaviot, pulttaускаaviot ja tunnelisuunnitelmatiedosto tallentuvat samaan hakemistoon. [15]. Kuvassa 3.9 on esitetty iSure-ohjelmiston käyttöliittymä, jossa näkymänä on koko tunnelin kattaava tunnelisuunnitelma.



Kuva 3.9: iSure-ohjelmiston tunnelisuunnitelmanäkymä [15].

Tunnelisuunnitelman sisältämä teoreettinen louhintaprofiili voidaan suunnitella käyttämällä olemassa olevia profileja, mutta myös uusien tunneliprofiilien suunnittelu on mahdollista usein eri keinoin. [15]. Teoreettinen tunneliprofiili toimii perustana porauskaavion suunnittelulle ja määrittää edelleen sen, minkälainen louhittavasta tunnelista tulee.

Porauskaavion suunnittelu tapahtuu iSure -ohjelmistossa teoreettisen tunneliprofiilin mukaan. Porauskaavion suunnitteluun vaikuttaa erityisesti louhittavan katkon pinta-ala, porattavien reikien pituus ja käytettävä räjähdaine, jotka vaikuttavat porattavien reikien lukumäärään ja tyyppiin. Porauskaavion lisäksi samalla suunnittelutyökalulla voidaan suunnitella kaikkien reikien panostus ja nallitus erikseen, jolloin yhdestä suunnitelma-aineistosta on nähtävillä jokaisen reiän sijainti, poraussyvyys, halkaisija, käytettävä räjähdaine ja nallityyppi. [15].

Pulttauskaavion suunnittelu iSure -ohjelmistosta tapahtuu kopioimalla teoreettinen louhintaprofiili pulttausprofiiliksi. Näin pulttien alkupiste on teoreettisen louhintaprofiilin pinta, jonka mukaan pulttien sijainti määritetään. [15]. Pulttauskaavion ominaisuuksiin kuten pulttiväliin ja pulttipituuteen vaikuttavat suunnittelualueen kalliomassan ominaisuudet, joiden perusteella pulttausprofiili tehdään.

iSure -ohjelmiston tiedonkeruun ominaisuuden käyttö vaatii kerätyn porausdatan tuonnin iSure -ohjelmistoon poralaitteelta. Kerätty data on rekisteröity reikäkohtaisesti ja ne tulevat porauslaitteelta .ZDA muotoisina tiedostoina. Kun tiedonkeruutiedostot on tuotu iSure:en, on kerättyä dataa mahdollista tarkastella reikä kerrallaan tai esimerkiksi koko poratun katkon reikiä yhtäaikaaisesti. iSure-ohjelmiston MWD-ominaisuuden käyttö vaatii tiedonkeruun ominaisuuden käyttöä. [15]. MWD-parametreja on mahdollista tarkastella myös yksittäinen reikä kerrallaan tai koko katkosta yhtäaikaaisesti.

Tässä diplomityössä ei käsitellä iSure-ohjelmiston MWD-analyysitoimintoa, jonka tekniikkaa ei paljasteta. MWD-analyysi perustuu porauslaitteen keräämän MWD-datan analysointiin.

4. PORAUKSENAIKAINEN MITTAUS - MWD

Tässä kappaleessa tarkastellaan analysoivan porauksenaikaisen mittauksen käyttömahdollisuuksia kalliotilarakentamisessa. Lähdetietona käytetään haastatteluja tunneliurakoitsijan kanssa, vierailuja tunnelinrakennustyömailla sekä MWD -datan vertailua prosessidataan sovelluksen kenttätestien kautta.

4.1 Johdatus porauksenaikaiseen mittaukseen

Porauksenaikaisen mittauksen historia juontaa juurensa 1900-luvun alkuun, jolloin ensimmäisiä mittauksia on tehty öljyteollisuuden parissa, mutta kaivosteollisuudessa porausparametrien rekisteröintiä on alettu tekemään 1970-luvulla [23]. Kalliorakentamisen saralla porauksenaikainen mittaus ja sen kehitys on yleistynyt 1990-luvulla, jolloin poralaitteiden tietokonepohjainen järjestelmäohjaus on kehittynyt [18]. Yhtenä suurimpina tutkimuksina voidaan pitää Håkan Schunnessonin tutkimuksia aiheesta.

Porattavan kalliomassan ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti louhinnan etenemisen nopeuteen. Ominaisuuksia pystytään tutkimaan ennen louhintaa tehtävillä ennakkotutkimuksilla, mutta niiden laajuus kattaa yleensä vain pienen alueen niiden ollessa suhteellisen hintavia. Tämän vuoksi kehitetään porauksenaikaisen mittauksen sovelluksia, jolla pystytään keräämään informaatiota louhinnan aikana porattavasta kalliosta, jolloin kalliomassan ominaisuuksista voidaan saada ennakkotietoa. Sovelluksen pyrkimyksenä on saada informaatiota porattavan kalliomassan ominaisuuksista itse tuotantoprosessia häiritsemättä, edullisesti, helposti ja tarkasti. Tällä tavalla porauksenaikaista mittausta pyritään hyödyntämään esimerkiksi maanalaisen kalliotilan louhintaprosessin optimoinnissa. [19]. Myös yleistävä tietomallipohjainen hanketoteutus esimerkiksi Norjassa on aiheuttanut MWD teknologian käytön yleistymisen, jolloin porausdatan ja geologisen kartoituksen tuloksia pyritään hyödyntämään tietomallin rakentamisessa ja edelleen kalliomassan ominaisuuksista saadun ennakkotiedon avulla voidaan varautua niiden vaatimiin toimenpiteisiin. [5].

MWD eli porauksenaikainen mittaus tarkoittaa yleisesti porausparametrien rekisteröintiä ja niiden keräämistä. Rekisteröitäviä porausparametreja ovat syöttöön, iskuun, pyörytykseen ja huuhteluun liittyvät parametrit. Myös tunkeumanopeutta ja reiän syvyyttä mita-

taan ja rekisteröidään. Analysoiva porauksenaikainen mittaus perustuu näiden porausparametrien analysointiin ja edelleen kalliomassan ominaisuuksien mallintamiseen ja visualisointiin. Analysoivan porauksenaikaisen mittauksen käyttömahdollisuuksista kerrotaan seuraavassa.

4.2 Porauksenaikaisen mittauksen käyttömahdollisuudet

Tässä kappaleessa tarkastellaan seikkoja, mihin porauksenaikaisella mittauksella saatavaa ennakkotietoa porattavan kalliomassan ominaisuuksista sekä datarekisteröintiä ja edelleen näiden toimintojen visualisointia voidaan hyödyntää. Tarkastelun kohteena on kehitysprojektin lähtökohtina pidetyt sovellukselta asiakasnäkökulmasta halutut ominaisuudet, joiden pohjalta myös luvussa 5 esiintyvät skenaariot on tehty. Asiakasnäkökulmalla tarkoitetaan valmiin sovelluksen asiakaskuntaa, joka kattaa urakoitsijatahon sekä rakennuttajatahon.

4.2.1 Geologinen kartoitus

Geologisen kartoituksen ominaisuus kalliotilarakentamisessa on yksi sovelluksen halutuimmista ominaisuuksista. Tällä tavoin rakennettavasta kallioista ja sen ominaisuuksista, pyritään saamaan tarkka kuvaus. Saatua analyysitulosta pyritään visualisoimaan halutun ominaisuuden perusteella ja visualisoinnit kootaan yhdeksi jatkuvaksi malliksi hankkeen kattavasti. Tällä hetkellä geologisen kartoituksen tekee kalliorakennuskohteissa yleensä kyseiseen työhön palkattu geologi, joka tekee kartoituksen silmämääräisesti aina räjäytetty katko kerrallaan [25]. Sovelluksen geologisen kartoituksen avulla pyritään saattamaan kaikki poraamalla saatu kalliomassan ominaisuustieto tarkasteltavaksi samaan malliin, joka mahdollistaisi helpon ja nopean tarkastelun halutusta paikkatiedosta verrattuna geologin tekemien manuaalisten raporttien tarkasteluun. Tarkastelussa on myös geologin tekemän kartoituksen ja geologin tekemän kartoituksen yhdistäminen, joiden arvonäkökohtia tarkastellaan luvussa 5 skenaariossa 7.

Geologisen kartoituksen tarve nähdään erityisesti kalliorakennushankkeiden kasvavien vaatimustasojen vuoksi. Kasuvat vaatimustasot johtavat hankkeiden tehokkaampaan ja tarkempaan dokumentointiin kehittyvän laitteiston ohella, jonka työkaluna MWD-analyysiä ja sen visualisointia pyritään käyttämään. Kerätyllä datalla pyritään jakamaan hankkeen osapuolten välistä riskiä. [7]. Myös kalliorakennushankkeiden siirtyminen tietomallipohjaiseen toteutukseen nähdään geologisen kartoituksen mahdollisuuksina [5].

4.2.2 Poraus- ja panostussuunnittelu

MWD-analyysin käyttömahdollisuudet poraus- ja panostussuunnittelussa nähdään pitkäreikäporauksesta tehdyllä analyysillä saadun ennakkotiedon kalliomassan ominaisuuksista hyödyntämisenä esimerkiksi tulevan heikkousvyöhykkeen tapauksessa. Pitkäreikäporauksesta tehdyn analyysin antama aikapuskuri mahdollistaa esimerkiksi porauskaavion optimoinnin, joka katkonporauksen tapauksessa on jo mahdollisesti liian pieni porauskaavion muutoksiin. Myös geologisen kartoituksen mahdollistama kalliomassan ominaisuuksien tarkastelu ja siinä mahdollisesti havaittavat hitaammat muutostrendit voivat mahdollistaa poraus- ja panostussuunnittelun optimointia, kun tarkastelussa on katkonporauksesta kerätty data. [25].

Poraus- ja panostussuunnittelussa merkittävimpinä sovelluksen tuomina etuina nähdään siis mahdollisuus varautua muuttuviin kallio-olosuhteisiin riittävällä aikapuskurilla. Etenkin pitkäreikäporauksesta tehdyn analyysin tarkasteluun nähdään aikapuskuri riittävänä, mikäli esimerkiksi havaittu heikkousvyöhyke on yhden tai useamman räjäytettävän katkon päässä. Työmaan kiireinen aikataulu rajoittaa mahdollisuutta muokata porauksen ja panostuksen asetuksia lyhyellä varoitusaajalla.

4.2.3 Lujitustarpeen määrittäminen

Kallion lujitustarpeen arviointiin kenttättestiasiakkaamme on ilmoittanut analysoivalla MWD-teknikalla saatavan kallion Q-luvun määrittämisen olevan haluttu ominaisuus. Q-luvun määrittäminen ei voida suoraan tehdä poralaitteesta saatavista porausparametreista tehdyllä analyysillä, mutta korrelaatio geologin tekemään Q-luokitukseen olisi löydettävä [25]. Mikäli reikien porauksesta saatavalla MWD-analyysillä voidaan määrittää yhteyksiä geologin tekemään Q-luokitukseen porattavalla alueella, urakoitsija pystyisi jo ennen katkon räjäyttämistä määrittämään tai arvioimaan tulevaa lujitustarvetta.

Kehitysprojektiin aikana pidettiin geologiapalavereja yhteistyössä erään kalliotilojen suunnitteluun erikoistuneen insinööritoimiston kanssa, joissa kerättyä MWD-dataa verrattiin geologien tekemiin kartoitustietoihin. Pyrkimyksenä oli löytää korrelaatiota Q-luokituksen RQD-parametriin, joka kuvaa kalliomassan rakoiluasteetta tietyllä osuudella. Tällä tavalla pyrittiin kehittämään sovelluksen mahdollisuutta lujitustarpeen arviointiin analyysituloksen perusteella. Lujitustarpeen määrittämisen arvoa MWD-analyysin perusteella tarkastellaan luvussa 5 skenaariossa 3.

4.2.4 Injektointitarpeen määrittäminen

Injektointitarpeen määrittämiseen käytettävän menetelmän määrittelee työn tilaaja [25]. Suomessa MWD-analyysiin perustuvaa injektointitarpeen määrittäystä ei ole vielä käytössä, mutta esimerkiksi muissa Pohjoismaissa jotkut tilaajat hyväksyvät tämän menetelmän. Suomessa injektointitarpe määritellään vesimenekkikokeella, joka tehdään tunneliprofiiliin porattavista, noin 20-25m pituisista tunnustelurei'istä. Injektointitarpeen määrittäminen MWD-analyysin perusteella on ollut yksi sovelluksen kehityksen käynnistäneistä halutuista ominaisuuksista, millä pyritään korvaamaan seuraavaksi esitetyn vesimenekkikokeen tekeminen.

Vesimenekkikokeen suoritustapa

Vesimenekkikoe tehdään injektointityön alussa poratuista tunnustelurei'istä. Vesimenekkikokeessa määritetään kallion vedenjohtavuutta pumppaamalla kallioon vettä eri paineilla ja mittaamalla pumpatun veden määrää. Pumppauspaine valitaan vallitsevan pohjaveden tason mukaan, koska pohjaveden hydrostaattinen paine vastustaa pumppausta. [20]. Tunnustelurei'istä tehtävässä vesimenekkikokeessa suositellaan käytettävän kolmea eri paineen arvoa viidellä eri mittauksella seuraavasti:

1. mittaus; pienin paine 10 minuuttia
2. mittaus; keskipaine 10 minuuttia
3. mittaus; suurin paine 10 minuuttia
4. mittaus; keskipaine 10 minuuttia
5. mittaus; pienin paine 10 minuuttia

Myös vesimenekkikokeessa asetetaan tunnustelureikiin mansetit. Mansetit asetetaan suunnittelijan määrittämälle syvyydelle reikään, yleensä noin kahden metrin syvyyteen, mutta vaikeissa olosuhteissa jopa viiden metrin syvyyteen. Näin vältetään mansetin ohi virtaavan veden pääsy tunneliin. Kokeen alussa mansettiin johdetaan vettä kunnes haluttu paine saavutetaan. Kun haluttu vakiopaine saavutetaan, aloitetaan mittaus mittaamalla reikään virtaava vesimäärä 5-10 minuutin ajalta. Mittauksen jälkeen vedensyöttö katkaistaan ja painemittarista seurataan, mihin arvoon paine laskee. Tiedot merkitään mittauslomakkeeseen, johon merkitään myös mitattavan reiän pituus ja mansetin syvyys reiässä. [20]. Injektoinnin aloituskriteerinä käytetään usein Lugeon arvoa, joka on nimetty vesimenekkikokeen kehittäjän mukaan. Lugeon arvo lasketaan kaavalla:

$$Lug = \frac{Q}{L \bullet t \bullet P}, \quad (4.1)$$

jossa Q on reikään pumpattu vesimäärä litroissa, L on mittausalueen pituus porareiässä metreinä, t on mittausaika minuutteina ja P on ylipaine megapascalissa. Yksi Lugeon on siis litraa minuutissa reikämetriä ja megapascalin ylipainetta kohden. Ylipainetta P määrittäessä on huomioitava pohjaveden pinnan ja vesimenekkikoelaitteiston painemittarin välinen korkeusero. [20].

Mikäli porauksenaikaisella mittauksella pystytään tunnistamaan poratussa kalliomassassa vallitsevat vesiolosuhteet, voitaisiin sillä korvata edellä kuvattu vesimenekkikokeen suoritus. Tämä vaatii kuitenkin tilaajaosapuolen hyväksynnän porauksenaikaisen mittauksen analyysin käytöstä injektointitarpeen määrittämisen työkaluna. Mikäli tämä tulee mahdolliseksi, voidaan katsoa, että urakoitsijaosapuoli hyötyy louhintaprosessissaan eliminoimalla vesimenekkikokeen tekemisen.

4.3 Porauksenaikaisen mittauksen rajoitukset

Porauksenaikaisen mittauksen datarekisteröinnin jatkuvuutta ja datan oikeellisuutta on kenttätestauksen aikana havaittu häiritsevän tietyt vaiheet kallion porauksen aikana. Koska MWD-analyysi perustuu porausparametrien analysointiin, tietyt seikat porauksessa vaikuttavat analyysiin tavalla, jota ei voida välttämättä täysin eliminoida.

Porauksenaikainen mittaus ja sen perusteella tehty kalliomassan rakoilun analysointi riippuvat rakoilun suunnasta porauksen suuntaan nähden. Rakoilua voi esiintyä kalliossa käytännössä missä suunnassa tahansa, tietyissä suunnissa ominaisrakoilua esiintyy tiheämmin kuin muissa suunnissa. Rakoilun esiintyminen ja sen suuntautuneisuus on kallion syntymekanismien ja esimerkiksi jääkauden aiheuttaman kuormituksen aikaansaama kalliomassan ominaisuus. Louhintatarkoituksessa kalliota porataan suunnitelmien mukaiseen suuntaan. Tällöin porauksenaikaisella mittauksella on havaittavissa rakoilua, joka on poraussuuntaa nähden erisuuntaista. Tällöin esimerkiksi katkonporauksella ja pitkäreikäporauksella havaitaan vain rajallinen määrä kalliomassassa esiintyvää rakoilua. Kallio-pultteja porattaessa voidaan havaita muihin poraussuuntiin nähden poikkeavaa rakoilua, mutta pulttiporaus suoritetaan vasta katkonporauksen jälkeen jolloin siitä saatua analyysitulosta ei voida enää käyttää ennakkotietona varautumisessa. Pulttiporauksesta tehdyillä analyysillä voidaan kuitenkin havaita mahdollisia epäjatkuvuuskohtia kalliomassassa louhittavan tunneliprofilin ulkopuolella ja optimoida lujitusta sen perusteella.

Aloitusporaus, joka käsittää noin ensimmäiset puoli metriä reiän porauksesta, vaikuttaa analyysitulokseen, sillä porausparametrit saavuttavat tällä matkalla kyseisiä kallioolosuhteita vastaavat normaaliarvot. Tämä aiheuttaa eroavaisuutta etenkin kallion lujuutta kuvaavan Strenght Index -parametrin suuruudessa, kun verrataan aloitusporausta sen jälkeisen porauksen tuloksiin. Myös edellisen katkon räjäytyksen aiheuttama mikroraikoilu vaikuttaa analyysitulokseen kivimassan lujuutta heikentävästi. Edellisen katkon räjäytyksen vaikutusmatka analyysitulokseen on riippuvainen käytetystä panostusasteesta eli räjähdystapahtuman voimakkuudesta. Aloitusporauksen aiheuttamaa poikkeamaa analyysituloksessa ei kuitenkaan voida pitää erityisen merkityksellisenä rajoituksena, sillä informaatiota, joka on edempänä poraussuunnassa kalliotilaan nähden, voidaan pitää merkittävämpänä.

Pitkäreikäporauksessa tehtävä porakangenvaihto aiheuttaa vastaavan epäjatkuvuuskohdan kuin aloitusporaus, sillä poraus on pysäytettävä kangenvaihdon ajaksi ja taas aloitettava uudelleen. Myös pitenevä porakanki aiheuttaa energiahäviötä, joka saattaa vaikuttaa analyysitulokseen, kun porataan yli 20 m pituisia reikiä. Energiahäviö tapahtuu iskuaallon vaimenemisessa porakankien liitoksissa ja on suuruudeltaan noin 6-10% liitosta kohti [3].

Porakruunun kunto vaikuttaa sen tunkeutuvuuteen kallioon, mutta jota porauksenaikainen mittaus ei datarekisteröinnissä ota huomioon. Porakruunun kunnon vaikutuksen suuruudesta ei kenttätestin aikana saatu konkreettista tietoa, mutta sen voidaan katsoa antavan esimerkiksi parempia tuloksia Strenght Index -parametrille, sillä porausparametrien ollessa vakioituina tunkeumanopeus hidastuu ja analyysi olettaa kallion olleen lujempaa. Vaikutuksen voidaan kuitenkin katsoa olevan suhteellisen marginaalinen, eikä sillä ole vaikutusta rakoilun tunnistamisessa.

5. ARVOANALYYSI - MWD -ANALYYSIN ARVOPOTENTIAALIT TUNNELILOUHINNASSA

Analysoivan MWD:n arvonmäärittelyn tarkoituksena on löytää kehitettävän sovelluksen louhintaprosessiin tuomat hyödyt verrattuna ilman sovellusta tehtävään louhintaan. Sovelluksen arvo määritettiin arvopotentiaaleina, eli tietyntyyppisissä louhintaa helpottavina seikkoina louhinnan eri osaprosesseissa, jossa poraamalla saatua analysoitua informaatiota voidaan hyödyntää louhinnan tehostamiseksi. Sovelluksen pääominaisuuksina voidaan pitää poratun kalliomassan rakoilun, kiven lujuusominaisuuksien (Strength Index), kiviluokan (Rock Class Index) sekä vesiolosuhteiden tunnistamista ja visualisointia. Sitä, miten näiden ominaisuuksien analysointi ja visualisointi eri tunnelinporausvaiheista voi hyödyttää louhintaprosessia, on tarkasteltu tässä luvussa.

5.1 Arvonmäärittelyn periaatteet

Kehitettävän analysoivan MWD-sovelluksen arvonmäärittely tehtiin samanaikaisesti sovelluksen kenttätestauksen kanssa. Arvoa määritettiin tunnistettuihin kehityskohteisiin, luotuihin louhintaprosessiskenaarioihin sekä kenttätestipalaverikeskusteluihin pohjautuen. Tutkimuksen kannalta tärkeimpiä tilaisuuksia olivat kenttätestaajan asiantuntijoiden kanssa pidetyt palaverit, joissa arvopotentiaaleja ja niiden löytymistä louhintaprosessin eri vaiheissa käytiin läpi keskustelemalla eri näkökulmat huomioon ottaen. Keskusteluissa kenttätestaajan kanssa pyrimme soveltamaan arvonmäärittelyä yleispäteväksi erilaisiin louhintaprojekteihin eikä pelkästään kenttätestiprojekteihin. Yleisesti huomioon pitää ottaa, että vaikka tässä työssä tarkastellaan yhtä kenttätestiä, niin kalliotilarakentajat toimivat eri maissa, joissa louhintamenetelmät ja määräykset louhinnan suhteen poikkeavat toisistaan.

Arvonmäärittelyssä ei pyritty löytämään sovelluksen tuomaa konkreettista rahallista tai ajallista arvoa, sillä niiden suuruus voi vaihdella huomattavasti riippuen projektista, toteutusmaasta sekä käyttäjän kokemuksesta. Sen sijaan keskustelujen tulokseksi pyrittiin löytämään louhinnan osaprosesseja, joissa voidaan saavuttaa hyötyjä käyttämällä sovellusta. Löydettyjen arvopotentiaalien perusteella on helpompaa arvioida projektikohtaisesti kokonaisuutta, minkälaisena sovelluksen käytön tuoma hyöty voi todentua esimerkiksi rahallisina tai ajallisina säästöinä. Tarkastelussa pyrittiin ottamaan myös huomioon mah-

dolliset louhinnan laatuun ja työturvallisuuteen vaikuttavat seikat.

Yleisinä visioina sovelluksen kehittämisessä on ollut halukkuus poratun kalliomassan Q-luokituksen sekä vesiolosuhteiden määrittämisen mahdollisuus suoraan analysoidusta porausdatasta. Näiden kalliomassan ominaisuuksien mukaan pystytään tekemään kalliotilan vaatimaa lujitus- ja tiivistystarpeen määrittäminen. Q-luokituksen määrittämistä porausdatasta voidaan pitää käytännössä mahdottomana, sillä Q-luokitus ottaa huomioon esimerkiksi kalliomassassa esiintyvän rakoilun karheuden (parametri J_r) sekä rakopintojen muuttuneisuuden (parametri J_a). Näiden parametrien määrittäminen vaatii kuitenkin rakopintojen silmämääräistä tarkastelua. Ongelmatiikasta huolimatta sovelluksen kehittämistä jatkettiin ja arvopotentialiaaleja etsittiin myös muualta louhintaprosessista kuin lujitus- ja tiivistystarpeen määrittämisestä.

5.2 MWD -analyysin arvopotentialit

Analysoivan MWD:n arvopotentialiaaleja löydettiin kehitysprojektin edetessä niin Sandvikin omissa palaverissa kuin palaverissa kenttätestaajan kanssa. Myös luotuja skenaarioita käytettiin arvopotentialien tunnistamisen apuvälineenä. Skenaarioita luotiin eri louhintaprosessiin liittyvistä osaprosesseista ja niitä käytettiin haastattelujen pohjana, jotta voitiin löytää niitä seikkoja, joihin MWD-analyysillä pystytään louhinnassa vaikuttamaan. Skenaariot luotiin optimistisesti ja yksinkertaistetusti, mutta kuitenkin niin, että niiden pohjalta pystyttiin ohjaamaan keskustelua ja löytämään kriittiset arviot mahdollisesta arvopotentialista kyseisen skenaarion tapauksessa. Keskusteluissa tuli esille myös muita mahdollisia arvopotentialiaaleja skenaariomenettelyn ulkopuolelta.

5.2.1 Luodut skenaariot ja niiden arvopotentialit

Skenaarioita luotiin yhteensä kahdeksan kappaletta. Kaikista luoduista skenaarioista käytiin keskustelua ja niiden tuoman arvopotentialin tärkeyttä arvioitiin kenttätestaajan kanssa. Skenaariot käsitellään yksitellen ja niissä otetaan huomioon kenttätestaajan antamat kommentit.

Ensimmäinen skenaario

Heikkousvyöhykkeen havaitseminen tunnustelu- tai injektointiporauksessa ja näin saatu mahdollisuus varautua heikkousvyöhykkeen vaatimiin toimenpiteisiin louhinnassa.

Skenaarion arvopotentialia pyrittiin määrittämään louhintaa suorittavan osapuolen mahdollisuutena varautua heikkousvyöhykkeen tuomiin lisävaatimuksiin louhinnan suhteen. Ennakkotiedon saamista tunnustelu- tai injektointiporauksessa verrattiin siihen, että tieto saataisiin vasta katkonporauksessa, minkä kohdalla heikkousvyöhyke on. Tunnustelu- ja injektointiporauksessa reikäpituudet vaihtelevat yleisesti noin 20 - 25 metrin välillä ja katkonporauksessa noin 4 - 6 metrin välillä. Optimaalisessa tilanteessa heikkousvyöhykkeen havaitseminen voi siis tapahtua jopa neljä louhintasykliä ennen heikkousvyöhykkeen sisältävän katkon poraamista. Mikäli heikkousvyöhykkeestä saadaan tietoa sen dimensioista ja suuntautuvuudesta, antaa se louhintatyötä suorittavalle osapuolelle aikaa varautua esimerkiksi lujituksen ja tiivistyksen mahdollisiin lisätoimenpiteisiin heikkousvyöhykkeen kohdalla, sekä mahdollisuuden mahdolliseen poraus- ja panostussuunnittelun optimointiin.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Ennakkotiedon saaminen porattavasta kalliomassasta on tärkeimpiä sovelluksen tuomia ominaisuuksia. Sen avulla voidaan varautua eri toimenpiteisiin ja vaikutus voi näkyä monessa eri louhinnan vaiheessa. [25].

Skenaarion perusteella voidaan siis sanoa, että ennakkotiedon saamisella kalliomassasta voidaan katsoa olevan hyötyä varautumisessa eri toiminnoissa heikkousvyöhykkeen louhinnan suhteen. Eri toimijat voivat kuitenkin nähdä ennakkotiedon tuoman arvon itselleen tärkeämpänä kuin toiset, ja tiettyjä toimintamalleja käytettäessä myös rahallista tai ajallista arvoa voi tällaisissa tapauksissa esiintyä esimerkiksi resurssien sitomisella ja kohdentamisella oikeaan ajanhetkeen.

Toinen skenaario

Mahdollisuus injektointitarpeen määrittämiseen suoraan porausdatasta tehdystä MWD-analyysistä ja analyysin käyttö vesimenekikokeen korvaajana.

Skenaarion arvopotentialia pyrittiin tarkastelemaan sovelluksen mahdollisuutena tunnistaa kalliomassan vesiolosuhteet ja näin korvata vesimenekikoe injektointitarpeen määrittämisessä. Suomessa käytetään tällä hetkellä injektointitarpeen määrittämisessä yleisimmin

vesimenekkikoetta, jonka menetelmän hankkeen tilaajaosapuoli määrittää. Skenaarion arvopotentialina tarkastellaan tilannetta, missä MWD-sovelluksen kyky vesiolosuhteiden tunnistamiseen pystytään vakuuttavasti todistamaan ja näin perustelemaan sen käyttö hyväksyttävänä menetelmänä injektointitarpeen määrittämiseen. Tällaisessa tapauksessa sovelluksen arvopotentialiksi voidaan katsoa sovelluksen vesiolosuhteiden tunnistamiseen poratessa kuluva aika verrattuna vesimenekkikokeen suorittamiseen kuluvaan aikaan.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Mikäli vesiolosuhteiden määrittäminen tehdään suoraan poratessa, voidaan säästää aikaa vesimenekkikokeen verran. Olisi myös hyödyllistä, mikäli porausdataa voitaisiin hyödyntää injektointimassan reseptin valinnassa. [25].

Mikäli sovelluksen ominaisuus vesiolosuhteiden tunnistamiseen ja sitä kautta injektointitarpeen määrittämiseen on riittävällä tasolla, voidaan sen arvopotentialiksi katsoa vesimenekkikokeen korvaaminen. Myös mahdollinen porausdatasta tehtävä injektointimassan reseptin oikea valinta onnistuessaan voisi esimerkiksi näkyä injektoinnin parempana tiiveytenä sekä mahdollisena massamenekin vähentymisenä. Arvopotentialin realisoituminen vaatii kuitenkin ainakin vesimenekkikokeen korvaamisen osalta tilaajaosapuolen hyväksynnän MWD-analyysin käytöstä injektointitarpeen määrittämisessä. Kuitenkin injektointimassan reseptin valinnassa voidaan mahdollisesti käyttää esimerkiksi sovelluksen avulla saatavaa tietoa kalliomassan rakoilusta.

Kolmas skenaario

Mahdollisen korrelaation löytymien RQD-lukuun poratessa kalliossa ja näin mahdollisuus lujitustarpeen ennakoarviointiin ennen geologin tekemää määrittäystä kallioluokituksesta.

Skenaarion arvopotentialina tarkastellaan MWD-analyysin mahdollisuutta kallion luokituksen arviointiin porausdatan perusteella. Q-luokituksen määrittämisen porausdatasta ollessa käytännössä mahdotonta tarkastellaan sen korrelaatiota RQD-lukuun, joka kuvaa kalliomassassa esiintyvän rakoilun tiheyttä yhtenä Q-luvun määrittämisen parametrina. RQD-luvun korrelaation löytyessä ja analysoidun datan yhdistäminen esimerkiksi kiiven lujuustietoon sekä ennakkotietoon kalliomassassa vallitsevien rakoilupintojen ominaisuuksista ja jännitystilatietoihin, voitaisiin mahdollisesti analyysiä käyttää lujitustarpeen määrittämiseen. Menetelmän käyttöön vaikuttaa tilaajaosapuolen antamat määräykset lujitustarpeen arvioinnista sekä geologin saatavilla olo kallioluokituksen kartoituksen tekemiseksi.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Aikataululliset näkökulmat eri toimenpiteisiin varautumisessa. Varautuminen esimerkiksi ruiskubetonointiin jo hieman etukäteen. Työnaikaiseen pulittaukseen päätöksentekoon mahdollinen apuväline. [25].

Skenaarion arvopotentialin täydellinen realisoituminen vaatii siis sovelluksen RQD-luvun tunnistamisen riittävää korrelaatiota geologin määrittämään RQD-lukuun. Geologin tekemää kallioluokituksen määrittystä tullaan tuskin koskaan täysin korvaamaan MWD-analyysillä tehtävällä määrittämisellä, mutta määrittäykset voisivat täydentää toisiaan, jolloin saadaan vielä tarkempaa tietoa kalliomassan ominaisuuksista. Geologi tekee kartoituksensa vasta kun perä on ammuttu ja irrotettu louhe on kuljetettu ulos tunnelista. MWD-analyysi poratusta katkosta on kuitenkin saatavilla tarkasteltavaksi heti porauksen päätyttyä, joten tällä saavutetaan myös aikaetua ja eri toimenpiteisiin voidaan varautua esimerkiksi suunniteltaessa työnaikaista lujitusta. Geologi tekee myös kartoituksensa kalion seinämistä ja katosta, joista louhittu kivimassa on irrotettu, kun taas MWD-analyysi tehdään irrotetusta kivimassasta, jota on porattu. Tämä mahdollistaa informaation interpoloinnin ja syvemmän tarkastelun. Huomioitavaa on kuitenkin se, että lujitus tehdään jäljellejääneeseen kalliomassaan, mutta sen ominaisuuksista voidaan saada arvioita myös irrotetun kalliomassan ominaisuuksista.

Neljäs skenaario

Injektointiporauksessa havaittu "piiloheikkousvyöhyke" louhitun tunneliprofilin ulkopuolella ja havainnon tuoma mahdollinen lisäys työ- ja kalustoturvallisuuteen.

Skenaarion arvopotentialina tarkastellaan tilannetta, jossa injektointiporauksesta tehtävällä analyysillä havaitaan louhittavan tunneliprofilin ulkopuolella heikkousvyöhyke, joka aiheuttaa mahdollisen sortumavaaran. Havainnoinnin perusteella voitaisiin tehdä mahdollisia lujitustoimenpiteitä sortuman ehkäisemiseksi. Tilanteeseen liittyvän arvopotentialin realisoituminen on vaikea todentaa, sillä mahdollisen sortuman toteutumisen arviointi on vaikeaa. Myös työ- tai kalustoturvallisuuden parantumisen mittaaminen on vaikeaa, mutta skenaariossa tarkastellaan kuitenkin tilannetta, jossa sortuma pystyttäisiin estämään MWD-analyysistä tehtävällä havainnolla.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Työ- ja kalustoturvallisuuden näkökulmat ovat tärkeitä. Tämänkaltaista arvoa periaatteessa vaikea mitata ja todentaa. [25].

Kuten asiakkaidemme kommenteista huomataan, on työturvallisuuteen liittyvät seikat tärkeitä, mutta skenaarion arvopotentialin realisoituminen hankalaa todentaa. Sovelluksen tuomaksi lisäarvoksi voidaan tässä tapauksessa katsoa lisäinformaation saaminen louhitavan tunneliprofilin ulkopuolella olevasta, jäljellejäävästä kalliomassasta. Mikäli tunneliprofilin läheisyydessä havaitaan mahdollinen työturvallisuutta heikentävä heikkousvyöhyke ja mahdollisiin lujitustoimenpiteisiin päätetään ryhtyä, voidaan skenaarion arvopotentiali katsoa realisoituneeksi.

Viides skenario

Katkonporausdatasta tehdystä analyysistä saatu informaatio kalliomassan ominaisuuksista, kun se on saatavilla tarkasteltavaksi esimerkiksi 12 tuntia ennen geologin tekemää määrittystä.

Skenaariotilanteessa tarkastellaan katkonporauksesta tehdyn MWD-analyysin saamista tarkasteltavaksi heti katkonporauksen päätyttyä, kun sitä verrataan geologin tekemään kartoitukseen, joka tapahtuu porauksen jälkeen tapahtuvan panostuksen, räjäytyksen, tuuletuksen, louheen kuljetuksen ja rusnauksen jälkeen. Arvopotentialina tässä skenaariossa on MWD-analyysillä saavutettava aikaetu geologin tekemään kartoitukseen verrattuna. Louhintatyö on monilta osin todella optimoitua ja aikarajoitteista, joten kalliomassan ominaisuuksien tarkasteluun ja sen kautta mahdollisiin toimenpiteisiin varautumiseen ja suunnitteluun voi tällä tavoin saada huomattavasti enemmän aikaa. Saavutetulla aikaedulla ja toimenpiteiden täsmällisemmällä suunnittelulla ja varautumisella voidaan mahdollisesti saavuttaa ajallisia ja rahallisia säästöjä louhintaprosessissa.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Mahdollistaa resurssien nopeamman liikuttelun, varautumisen ja aika-
taulutuksen, mikäli pystytään varmuudella toteamaan informaation hyödynnettävyys. Hankekohtaisesti riippuva asia onko geologi käytettävissä koko ajan verrattuna siihen, että geologi käy kohteessa harvemmin. [25].

Oletuksena skenaariossa on se, että MWD-analyysillä saatava informaatio on hyödynnettävää, joka on myös luonnollisesti kehitettävän sovelluksen tavoite. Mikäli arvioitu aikahyöty saavutetaan ja se pystytään hyödyntämään louhintatyön resurssien optimointiin, realisoituu arvopotentiali. Skenaariotilanteen suuruista aikaetua voidaan pitää suurena ajatellen louhintaprosessia, joten sen voi katsoa olevan yksi sovelluksen merkittävimmistä ominaisuuksista ajatellen kalliomassasta saatavaa ennakkotietoa suunnittelun apuvälineenä. Ennakkotiedon saaminen voi näkyä monessa työvaiheessa, mutta lujitus- ja tiivistys-suunnittelu ovat varmasti merkittävimmät, kun tarkastellaan esimerkiksi tilannetta, jossa lujitus tarvitsee ruiskubetonointia. Tällaisessa tapauksessa ruiskubetonin tarve tiedetään hyvissä ajoin ja se voidaan tilata työmaalle oikea-aikaisesti. Tilanteessa, jossa resurssien aikataulutusta pystytään optimoimaan, voi saavutettu hyöty kertautua aina seuraaviin työvaiheisiin.

Kuudes skenaario

Geologisen kartoituksen mahdollistama poratun kalliomassan visuaalinen tarkastelu ja sen käyttö esimerkiksi todistemateriaalina urakoitsijan ja tilaajan välillä tai esimerkiksi työmaan viikkopalaverissa.

Sovelluksen tiedonkeruun ominaisuus mahdollistaa poratusta kalliosta saadun MWD-datan visualisoinnin iSure-ohjelmistossa. Visualisointiin voidaan liittää kaikesta eri porauksesta kerätty informaatio ja visualisoituna voi olla joko raakadataparametrit tai analysoidut suureet kallion ominaisuuksista. Visualisointeja voidaan tarkastella halutusta kohdasta tunneliprofilia ja visualisointityylejä voi olla 2D- tai 3D- visualisoinnit. Skenaariotilanteessa tarkastellaan sovelluksen tuomaa mahdollisuutta poratun kalliomassan ominaisuuksien visuaaliseen tarkasteluun ja sen käyttömahdollisuuksiin eri tilanteissa.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Tilaajan hyväksyntä visuaalisen datan käytöstä todistemateriaalina. Visuaalisen datan informatiivisuus/selkeys verrattuna numeeriseen dataan on hyvä esimerkiksi palaveritilanteissa esitettäväksi. [25].

Skenaarion arvopotentialin realisoituminen voidaan tässä tapauksessa nähdä kalliomassan ominaisuuksien visuaalisena tarkasteluna numeerisen informaation sijaan. Visuaalisen datan koetaan olevan havainnollistavampaa ja se mahdollistaa informaation helpomman etsimisen ohjelmiston avulla, jossa tarkasteltavana voi olla hankkeen aikana kaikki suoritettu poraus. Visualisoinnin avulla voidaan esimerkiksi kuvata viikkopalaverissa asianosaisille mahdolliset kalliomassan ominaisuuksissa tapahtuvat muutostrendit, jotka

osaltaan vaikuttavat työn suorittamiseen [25].

Seitsemäs skenaario

MWD -analyysin ja geologin tekemän kallioluokitusmäärittelyn yhdistäminen ja toistensa täydentäminen.

Skenaariotilanteessa tarkastellaan katkonporauksesta tehtyä MWD-analyysiä kalliomasan ominaisuuksista ja sen yhdistämistä geologin tekemään kallioluokituksen määrittelyyn. Arvopotentialina skenaariossa on mahdollisesti lisääntyvä informatiivisuus kartoituksessa sekä saatujen tulosten visualisointi ja sitä kautta saavutettava mahdollinen tulosten helpompi tulkinta. MWD-analyysi voidaan tehdä esimerkiksi pelkistä tunneliprofiiliin poratuista reunimmaisista rei'istä, jolloin saatu analyysituloks on samasta pinnasta kuin geologin tekemä kartoitus Tällöin tulosten vertailu ja yhdistäminen on täsmällisintä. Kartoituksen ja analyysin yhdistäminen voisi tapahtua esimerkiksi iSure -ohjelmistoon mahdollisesti kehitettävällä piirtotyökalulla, jolloin geologi voi täydentää MWD-analyysin visualisointiin omat kartoitustuloksensa. Näin kartoitus olisi nopeasti liikuteltavissa tietoliikenneyhteyksillä eri osapuolille ja tulokset voidaan yhdistää edelleen koko hankkeen kattavaan geologiseen kartoitustietoon.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Ristiriitaisuustilanteet - kumpi on oikeassa? Datan vaikutus geologin päätöksentekoon?. [25].

Skenaarion arvopotentialin realisoituminen edellyttää tilannetta, jossa MWD-analyysillä tehty kartoitus ei pääse vaikuttamaan geologin tekemän kartoituksen tuloksiin. Ristiriitaisuustilanteita varten on päätettävä kumman analyysin tulokset ovat validimpia käytettäväksi. Onnistuessaan kartoitusten yhdistämisen mahdollisuudet nähdään kuitenkin erittäin hyödyllisinä etenkin, kun tuloksissa käytetään visualisointia ja tulokset saadaan yhdistettyä yhteen visualisointiin. Tämä mahdollistaa edelleen sen, että tuloksia voidaan vertailla yhdestä visualisoinnista verrattuna siihen, että geologin paperille tekemää kartoitustietoa verrataan iSure-ohjelmistossa olevaan MWD-analyysiin. Arvopotentialin realisoitumisen voidaan katsoa onnistuvan, kun MWD-analyysi ja geologin kallioluokituskartoitus ovat tehty ristiriidattomasti toisiinsa nähden ja geologin tekemä kartoitus voidaan helposti yhdistää MWD-analyysin visualisointiin.

Kahdeksas skenaario

Geologisen kartoituksen yhdistäminen mahdollisesti BIM-hankkeisiin tai muu vastaava elinkaarimallin tarkastelu poratun kallion ominaisuuksista ja tilan käytönaikaisten ongelmien analysointi kartoituksesta.

Tietomallipohjaisen suunnittelun ja hankkeen toteuttamisen voidaan sanoa olevan voimakkaasti yleistymässä myös infra-alan rakentamisessa, joten se on varmasti tulevaisuutta myös tunnelirakentamisessa. Tietomallipohjaisessa suunnittelussa kaikki suunnitelma-aineisto on yhdessä tietomallissa ja sitä pystytään muokkaamaan reaaliaikaisesti useamman suunnittelijan toimesta. Hankkeen elinkaarimallin ajattelu korostuu tietomalleissa, eli tietomallin aineistoa pyritään käyttämään koko tuotettavan hankkeen elinkaaren ajan etenkin ongelmatilanteiden tarkastelussa. Skenaariossa tarkastellaan MWD-analyysin hyödyntämistä mahdollisissa tietomalleissa esimerkiksi työsuoritteen etenemisen mittamisessa tai elinkaarimalliajattelua tarkasteltaessa kalliotilan käytönaikaisten ongelmien selvittämisessä. Esimerkkinä voidaan ajatella tilannetta, jossa kalliotilaan syntyy käytönaikainen vuoto, jolloin kyseisen kohdan MWD-analyysistä voidaan tarkastella tunneliprofilin ulkopuolisen kalliomassan ominaisuuksia ja analysoida edelleen ongelman syitä ja suunnitella korjaustoimenpiteitä. Skenaarion arvopotentialina tarkastellaan MWD-analyysin mahdollisuuksia toimia tietomallipohjaisessa toteutuksessa sekä sen käyttöä kalliotilan käytönajan ongelmien analysointiin.

Skenaarion kommentit kenttätestaajalta:

Kenttätestaaja: Yhteensopivuus aineistoissa - datan yhdistäminen suunnitelma-aineistoon on oltava mahdollista. Raportointimääräysten ja laadunvarmistuksen dokumentointi tulee todennäköisesti muuttumaan entistä tiukemmaksi. Mahdollisuudet projektirajat ylittävään tarkasteluun. [25].

MWD-analyysin hyödyntäminen ja skenaarion arvopotentialin realisoituminen edellyttää ennen kaikkea dataformaattien yhteensopivuutta, jotta esimerkiksi tietomallipohjainen suunnitteluaaineisto ja MWD-datan analyysiaaineisto on yhdistettävissä. Dataformaatin pitää olla myös sellainen, että se on mahdollista muokata niin, että sitä voidaan tarkastella myös tulevaisuudessa. Tämä korostuu etenkin hankkeissa, joiden elinkaari on pitkä. Näiden asioiden toteutuessa voidaan varmasti sanoa, että MWD-analyysillä voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä elinkaarimallihankkeiden tapauksissa etenkin juuri kalliotilan käytönaikaisten ongelmien tarkastelussa. Myös dokumentoinnin kehityssuunta nähdään sellaisena, että dokumentointi hankkeista tulee lisääntymään entisestään, jolloin MWD-analyysillä voidaan ainakin poratun kalliomassan ominaisuuksien dokumentoinnin osalta

pyrkii täyttämään nämä vaatimukset. Poraamalla saadun datan keruun voidaan sanoa varmasti olevan yksi sovelluksen tärkeimmistä kehitysominaisuuksista tulevaisuuden kannalta.

5.2.2 Kenttätestin aikana löytyneet arvonäkökohdat

Analysoivan MWD:n sovelluksen kenttätestin aikana olleissa palavereissa tuli esille myös skenaariotarkastelun ulkopuolisia arvopotentiaaleja. Myös skenaariotilanteisiin liittyviä tarkennuksia tarkastellaan tässä luvussa.

Yleisesti teknologian kehittymisen ja uuden teknologian valjastamisen louhintatyöhön katsotaan yleistyvän. Poraamisessa käytettävän uuden teknologian hyödyt nähdään etenkin porarisukupolven vaihtuessa. Kokeneimmat porarit osaavat arvioida kalliomassan ominaisuuksia melko hyvin porauksen aikana ja havaitsemaan mahdollisen ongelmatiikan kalliomassan ominaisuuksissa pohjautuen heidän kokemukseensa ja asiantuntemukseensa. Uuden sukupolven porareilla tulee olemaan apunaan uutta teknologiaa, joka toimii aputyökaluna porattavan kalliomassan ominaisuuksien arvioinnissa. Tämän vuoksi kehittyvän teknologian katsotaan olevan uusille porareille tukena poraustyössä.

Skenaariotarkastelussa tarkasteltiin tunneliprofilin ulkopuolelle ulottuvana porauksena vain injektointiporausta. Palaverikeskusteluissa tuli kuitenkin esille myös pulttiporauksesta tehtävä analyysi ja siitä saadun tiedon käyttö. Pulttiporaus suunnataan tunneliprofilista lähes kohtisuoraan ulospäin, jolloin siitä tehdyllä MWD analyysillä saadaan tietoa juuri siitä kalliomassasta, mihin lujitus tulee. Analyysistä voidaan edelleen tarkastella porausuuntaa, joka ei toteudu injektointi-, tunnustelu-, tai katkonporauksessa, jolloin voidaan saada tietoa esimerkiksi näihin poraustöihin nähden eri suunnassa esiintyvistä rakoiluista. Myös pulttiporauksen aloituskoordinaattien rekisteröinti nähtiin hyödyllisenä, jolloin tehdystä geologisesta kartoituksesta on mahdollista nähdä pulttien sijainti. Tätä tietoa voidaan taas käyttää kalliotilan käytönaikaisten ongelmien tarkastelussa hyötynä.

Kalliomassasta saatavalla ennakkotiedolla katsotaan olevan myös mahdollisuuksia kaavionsuunnittelun optimoinnissa. Mikäli MWD-analyysillä kerätyssä datassa havaitaan esimerkiksi tiettyjä muutostrendejä kalliomassan ominaisuuksissa, pystytään kaavionsuunnittelua ohjaamaan kalliomassan ominaisuuksien mukaiseksi. Tällä voidaan välttää esimerkiksi ylimääraisten reikien poraaminen, mikäli kalliomassan ominaisuuksien mukaan sen räjäyttämiseksi riittäisi pienempi määrä reikiä ja edelleen räjähdeainetta. Tätä kautta voi louhintaprosessissa kertyä säästöjä, kun porametr määrää ja edelleen räjähdeainemäärä vähenevät. Myös louhinnan laadun on mahdollista parantua kaavionsuunnittelun optimoinnilla. Kalliomassan muutostrendien havaitsemisella voidaan siis katsoa olevan

arvopotentialia kaavionsuunnittelun optimoinnin kautta, minkä vaikutukset voivat näkyä myös myöhemmissä louhintaprosessin vaiheissa.

Lujitustarpeen arviointiin heikkousvyöhykkeen tapauksessa lisätarkennuksena Kari Äikäs esitti, että mikäli heikkousvyöhykkeen laatu- ja dimensiotiedot saadaan ennakkotietona, voidaan lujitusten suorittamiseen varautua tarvittaessa ennakkoon [26]. Tällaisessa tapauksessa voidaan saavuttaa säästöjä, sillä lujittaminen voidaan tehdä tarvittavassa laajuudessaan ensimmäisellä kerralla. Tapauksen säästöt ovat ajallisia, sillä tarvittava lujitustyö on kaikissa tapauksissa tehtävä.

5.3 Kenttätesti ja sen onnistuminen

MWD-analyysisovelluksen kenttätesti toteutettiin eräessä kenttätestaajan kalliorakennushankkeessa käytettävillä Sandvik Mining and Construction Oy:n valmistamilla tunneliporalaiteilla. Poralaitteisiin asennettiin analyysin vaatimat mittauslaitteistot ja tiedonkeruuta varten urakoitsijan käyttöön annettiin kehitysversio iSure-ohjelmistosta, joka mahdollisti MWD-analyysin. Hankkeessa käytetyillä poralaitteilla suoritettiin katkon-, tunnustelu-, injektointi- ja kalliopulttien porausta, joista jokaisesta suoritettiin myös datankeruuta. Kerättyä MWD-analyysidataa analysoitiin Sandvik Oy:n toimesta.

Sovelluksen kenttätestin onnistumista arvioitiin niin kenttätestaajan kuin Sandvik Mining and Construction Oy:n toimesta. Kenttätestaajalle tärkeätä oli, että analyysisovelluksen käyttö tai asennus ei häiritse normaalia tuotantoprosessia. Sovelluksen vaatimat asennustyöt tehtiin poralaitteen käyttökaton aikana, jolloin se ei häirinnyt poralaitteen toimintaa. Sovelluksen tiedonkeruun ei myöskään koettu häiritsevän tuotantoprosessia. Voidaan siis sanoa, että sovelluksen kenttätestikäyttö ei häirinnyt normaalia tuotantoprosessia, vaan se toimi häiriöttömästi.

Sovelluksen keräämää dataa analysoitiin Sandvikin järjestämissä geologiapalaverissa. Palaverissa sovelluksen analysoimaa dataa verrattiin analysoidusta kohdasta geologin tekemään kalliokartoitukseen. Näin arvioitiin yhteyttä sovelluksen analyysiparametrien ja vallitsevan geologian välille. Tarkastelussa löydettiin korrelaatiota kohdassa, jossa porattiin vallitsevan heikkousvyöhykkeen läpi. MWD-analyysin visualisoinnissa tarkasteltiin etenkin rakoilu- ja kiviluokkaparametreja, joiden skaalausta säätämällä heikkousvyöhyke saatiin selvästi havaittavaksi analyysin visualisoinnissa. Heikkousvyöhykkeestä pystyttiin visualisoinnissa tarkastelemaan myös melko selvästi vyöhykkeen suuntautumista, joka geologin tekemään kartoitukseen vertaamalla osoittautui melko tarkaksi.

MWD-analyysisovelluksen kenttätestin voidaan katsoa onnistuneen hyvin, kun onnistumista tarkastellaan kenttätestaajan ja Sandvikin näkökulmasta. Sovelluksen toiminta ei aiheuttanut häiriötä tuotantoprosessiin ja sovelluksen keräämä ja analysoima data oli käytökelpoista sekä informatiivista.

6. TUNNISTETUT KEHITYSKOhteET JA SOVELLUKSEN MAHDOLLISUUDET

Sovelluksen kenttätestin ja arvonmäärittelyn jälkeen tunnistettiin seikat, joita sovelluksen osalta on kehitettävä sekä mahdollisuudet, johon sovelluksen halutaan kehitystyön jälkeen kykenevän. Tarkasteluun otettiin myös pidemmän tähtäimen suunnitelmia ja ajatuksia sovelluksen kehittämisestä.

6.1 Asiakaslähtöiset kehityskohteet ja toimenpiteet

Sovelluksen yleisen asiakaslähtöisen kehitysvision ollessa Q-luvun määrittelyn mahdollisuus suoraan porausdatasta, pyritään sovelluksen kehitystyössä löytämään riittävää korrelaatiota Q-luvun RQD-parametrin kanssa. Mikäli riittävä korrelaatio löytyy, voidaan mahdollisesti tulevaisuudessa kalliotilan lujitustarvetta arvioida riittävällä tarkkuudella MWD-analyysin perusteella. Q-luvun määrittämistä varten iSure-ohjelmistossa voisi olla mahdollisuus syöttää muut Q-luvun määrittämiseksi vaadittavat parametrit manuaalisesti esimerkiksi yleisesti porattavassa kalliomassassa vallitsevien arvojen mukaisesti [26]. Toinen mahdollinen tapa voisi olla arvioida lujitustarvetta Q'-luvun perusteella, jolloin kalliomassan vesiolosuhteet ja jännitystilaolosuhteet jätetään huomioimatta, koska nämä eivät välttämättä ole määritettävissä porausdatan perusteella. Lujitustarpeen määrittelyn mahdollisuus suoraan MWD-analyysistä koetaan siis olevan haluttu ominaisuus ja sovelluksen uskotaan pystyvän toimimaan työkaluna tätä varten, kunnes riittävä korrelaatio vaadittaviin kallioluokitusparametreihin löydetään.

Kallion poraamisen aloittaminen aiheuttaa MWD-analyysiin poikkeuksellisia arvoja esimerkiksi kiviluokkaindeksin ja kiven lujuusindeksin määrittelyssä. Tämä johtuu siitä, että poralaitteen datarekisteröinti tapahtuu mittaamalla poralaitteen porausparametreja, jotka eivät ole vielä porauksen alussa normalisoituneet. Aloitusporauksen suodatusmahdollisuudeksi katkonporauksessa esitettiin interpolointia edellisen porauksen päätepisteiden arvojen ja seuraavan katkon normalisoituneiden porausparametrien välillä näiden välimatkan ollessa noin 0,5 metriä. Interpolointia toteuttaminen iSure-ohjelmistoon on mahdollinen, mutta tällaisessa tapauksessa noin 10% MWD-analyysin sisältämästä datasta on interpoloitua, jolloin tarkka tieto kyseisen kalliomassan osuuden ominaisuuksista puuttuu.

Yksi mahdollinen keino ainakin suurten rakojen ja heikkousvyöhykkeiden löytymiseksi olisi tarkastella interpolointiosuutta vastaavaa MWD-analyysiä, joka on tehty injektointiporauksesta ja tunnusteluporauksesta. Tällä tavoin voidaan minimoida interpoloinnin aiheuttamaa virhettä analyysissä.

Yksi kenttätestipalaverissa tullut pitkän tähtäimen kehitysvisiona on se, että tiedonsiirto tunnelilouhinnassa käytettävien laitteiden välillä toimisi automaattisesti. Tämä edellyttää sovelluksen toiminnan luotettavuutta ja yleistä käyttöä kalliotilarakentamisessa. Esimerkkinä tapauksesta oli juuri lujitustarpeen määrittäminen, jossa poralaitteelta saadun datan perusteella tehdyn analyysin tulokset kulkeutuisivat esimerkiksi ruiskubetonointiautoon. MWD-analyysin perusteella ruiskubetonointiauto saisi tiedon tarvittavasta ruiskubetonin määrästä ja paikasta, johon ruiskubetonointi tehdään. Tämänkaltaisuus, jossa käytettävät tunnelilouhintalaitteet määrittävät toimintaansa MWD-analyysin perusteella tietoliikenneyhteyden avulla, vaatii merkittävää kehitystyötä toimiakseen. Tällainen ominaisuus nähtiin kuitenkin pitkän tähtäimen kehitysvisiona, jossa tunnelilouhintalaitteet saavat suunnitteluaineiston langattomasti ja tämän perusteella määrittävät toimintaansa keskenään.

Sovelluksen tiedonsiirron import- ja export-ominaisuuksien sekä dataformaatin kehittäminen nähdään erittäin tärkeänä ajatellen sovelluksen käyttöä tulevaisuudessa, mikäli sovelluksen analyysitulosta halutaan käyttää yhdessä muiden sovellusten ja ohjelmien kanssa. Muiden sovellusten rinnakkaistoiminnan voidaan katsoa olevan lisääntymässä muuttuvien raportointi- ja dokumentointimääräysten yhteydessä, sekä kalliorakentamisessa mahdollisesti yleistyvien tietomallipohjaisten hankkeiden toteutusmuodosta johtuen. Tällaisissa tapauksissa on sovelluksen edellytyksenä vaivaton tiedonsiirto ja dataformaatin yhteensopivuus tai sen muokattavuus yhteensopivaksi muiden käytettävien sovellusten kanssa. Tämä vaatii kuitenkin myös muiden sovellusten kehittämisessä mahdollisuutta eri sovellusten yhteensopivuuteen. Voidaan kuitenkin sanoa, että mikäli halutaan saada universaalisti haluttu ja mahdollisimman käyttökelpoinen sovellus, on MWD-analyysin siirron muihin ohjelmistoihin oltava mahdollista. Myös muiden ohjelmistojen datan on oltava mahdollista tuoda MWD-analyysiin.

6.2 MWD -datan käytön kehittäminen tunnelilouhintaprosessissa

Porauksenaikaisen mittauksen käytön edellytyksenä tunnelilouhinnassa ja sen osaprosessien optimoinnissa on hankkeiden tilaajaosapuolten hyväksyntä MWD-analyysin käytölle. Tilaajaosapuoli määrittelee menetelmät esimerkiksi injektointitarpeen ja lujitustarpeen määrittämiseen sekä raportointimääräysten ja geologiadokumentoinnin täyttämistä, jolloin MWD-analyysin käyttö näissä toimenpiteissä pitää olla hyväksyttyä. Tilaajaosapuo-

len hyväksynnän saamiseksi pitää sovelluksen toiminnan olla moitteetonta ja korrelaation todellisten kalliomassan ominaisuuksien kanssa pitää olla riittävää. Kalliorakennushankkeita yhdistää tehokas ajankäyttö ja se, että hankkeiden toimijat eivät ole halukkaita käyttämään sovellusta, joka toisi heille lisää työkuormaa. Tämän vuoksi sovelluksen käyttö tuskin tulisi juurikaan yleistymään ilman hankkeiden tilaajaosapuolten vaatimusta MWD-analyysin käytöstä. Tämän vuoksi tilaajaosapuolten vaatimusten voidaan katsoa olevan merkittävässä osassa MWD-sovelluksen käytön lisäämisessä. Vaikka vaatimukset toteutuisivat, on sovelluksesta silti pyrittävä kehittämään mahdollisimman helppokäyttöinen ja käyttäjäystävällinen, jotta sovelluksen käyttäjä saa siitä parhaan mahdollisen hyödyn itselleen, sovelluksen ominaisuuksista tinkimättä.

MWD-analyysin yhdistäminen tietomallipohjaisten kalliorakennushankkeiden suunnitelma-aineistoon vaatii edellisessä luvussa 6.1 kerrottuja ominaisuuksia sovelluksen tiedonsiirrostä ja dataformaatista. Käytön edellytyksenä on myös tietomallipohjaisen toteutuksen yleistymisen kalliorakennushankkeissa. Tietomallipohjainen hanketoteutus on yleistynyt infrarakentamisen alalla Liikenneviraston otettua se käyttöön omissa uusissa hankkeissa, joten sen voidaan sanoa olevan yleistymässä talonrakentamisesta myös muuhun rakentamiseen. Tämän vuoksi uskotaan, että tietomallipohjainen toteutustapa on myös vääjäämättä tulossa käyttöön myös kalliorakentamisessa. MWD-analyysin yhdistämisellä tietomallipohjaiseen suunnitelma-aineistoon voitaisiin tarkastella esimerkiksi hankkeen valmiusasteen toteutumista MWD-analyysistä saatavalla katkonporauksen reikien dimensio- ja paikkatiedoilla. Muuta tietomallipohjaiseen suunnitelma-aineistoon yhdistettävää MWD-analyysitietoa käsiteltiin luvussa 5.2.1 skenaariossa 8.

MWD-analyysin käyttö injektoinnin tiiveyden varmistamisessa on yksi seikka, mihin sovelluksen rakoiluntunnistusominaisuutta voitaisiin käyttää. Varmistamisessa tarkasteltaisiin ennen injektointia poratuista tunnustelurei'istä ja injektoinnin jälkeen poratuista kontrollirei'istä tehtyjä analyysejä. Mikäli tunnustelurei'istä tehdyssä analyysissä havaitaan rakoilua, joka edellyttää injektoinnin, tarkasteltaisiin injektointimassan kuivumisen jälkeen poratuista kontrollirei'istä tehdyn analyysin rakoilua samalla osuudella. Mielenkiintoista olisi havaita, miten kuivunut injektointimassa vaikuttaa MWD-analyysiin ja etenkin saatavaan rakoilutietoon kalliomassasta. MWD-analyysin käyttö injektoinnin varmistamisessa vaatii kuitenkin vielä referenssidataa, jossa havaitaan injektointimassan vaikutus analyysitulokseen. Tiiveyden varmistamiseksi on varmasti syytä todeta MWD-analyysin lisäksi kontrollirei'istä mahdollisesti valuva vesi, mutta esimerkiksi tiiveyden varmistamiseksi mahdollisesti tehtävä vesimenekkipoke voitaisiin tällä keinolla ehkä pystyä korvaamaan.

6.3 Muita kehitysideoita ja mahdollisuuksia

Yhtenä projektin aikana pohdittuna mahdollisuutena oli sovelluksen mahdollisuus automaattiseen raportointiin MWD-analyysistä. Tällä tarkoitetaan sitä, että aina halutun porauksen päätyttyä iSure-ohjelmistosta on mahdollisuus lähettää määrätyille henkilöille määrättyjen ennakoasetusten mukainen raportti esimerkiksi PDF-muodossa sähköpostiin. Raportissa voisi olla visualisoituna esimerkiksi injektointiporauksesta saatu rakoilu- ja vesiolosuhdetieto, jolloin kohdehenkilö saa välittömästi porauksen päätyttyä raportin poratun kalliomassan ominaisuuksista. Ominaisuuden hyödyt voisivat konkretisoitua esimerkiksi injektointi- ja lujitustarpeen määrityksissä, jolloin toimenpiteistä vastaava taho saisi välittömästi tarvittavaa informaatiota tarkasteltavakseen päätöksenteon avuksi. Toisaalta ominaisuus mahdollistaa myös informaation tarkastelun - raportin tiedostomuodosta riippuen - myös mobiililaitteissa, jolloin sen tarkastelu on mahdollista myös muualla kuin iSure-ohjelmistoa käyttävällä tietokoneella. Yhtenä ominaisuuden etuna voidaan tarkastella myös saatavan informaation aikahyötyä.

7. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä oli tavoitteena selvittää analysoivan MWD-sovelluksen arvo kalliorakentamisessa. Tutkimus toteutettiin samanaikaisesti Sandvik Mining and Construction Oy:n sovelluksen kenttätestin kanssa. Tutkimus perustui sovelluksen arvopotentiaalien tarkasteluun louhinnan eri osaprosesseissa luotujen skenaarioiden ja kenttätestiurakoitsijan kanssa käytyjen keskustelujen avulla.

Tutkimuksen perusteella sovelluksen arvopotentiaalien realisoitumiseen vaikuttaa ennen kaikkea kehitettävän sovelluksen moitteeton toiminta ja saadun informaation oikeellisuus. MWD-analyysiä käytettäessä on myös huomioitava käytön rajoitukset, joita aiheuttavat poraussuunta esimerkiksi rakoilun tai liuskeisuuden suhteen, aloitusporaus, kangenvaihdot sekä porakruunun kunto. Tutkimuksen arvonmäärityksen oletuksena on kuitenkin ollut, että sovelluksen avulla saatava MWD-analyysidata on tarkoituksenmukaista ja informatiivista, jolloin sitä pystytään hyödyntämään louhintaprosessin optimoinnissa.

MWD-analyysisovelluksen merkittävimmät ominaisuudet louhintaprosessin kannalta ovat tutkimuksen perusteella ennakkotiedon saaminen porattavan kalliomassan ominaisuuksista sekä geologisen kartoituksen tekeminen ja geologiatiedon arkistointi. Ennakkotiedon saaminen poratun kalliomassan ominaisuuksista voi realisoitua ajallisena, rahallisena tai laadullisena hyötynä louhintaprosessissa sekä mahdollisena työ- ja kalustoturvallisuuden parantumisenä. Ennakkotiedon hyödyntäminen voi näkyä monessa eri louhintaprosessin työvaiheessa, mutta merkittävimpinä työvaiheita, joissa hyödyntäminen voi olla mahdollista, ovat kallion tiivistys ja lujitus. Mikäli tiivistyksen ja lujituksen tarvetta voidaan luotettavasti arvioida suoraan MWD-analyysistä, saavutetaan merkittäviä hyötyjä louhintaprosessin ajankäytössä.

Geologiseen kartoitukseen liittyvät hyödyt realisoituvat tilan käytönaikaisten ongelmien tarkastelussa sekä siirtymisessä mahdolliseen tietomallipohjaiseen hanketoteutukseen kalliotilarakentamisessa. Nämä tapaukset edellyttävät sovelluksen yhteensopivuutta suunnitelma-aineistoon sekä sovelluksen MWD-analyysin dataformaatin säilymistä niin, että sen tarkastelu on mahdollista kalliotilan käytönaikaisissa vaiheissa. Kalliotilan käytönaikaisten ongelmien tarkastelussa kyseeseen tulevat geologiatiedon tarkastelu mahdollisten syntyneiden vesivuotojen tai kallion siirtymien tapauksessa. Näiden ongelmatilanteiden tarkas-

telussa on vallitsevan ongelma-alueen kalliomassan ominaisuustiedolla tärkeä rooli, jotta korjaustoimenpiteet pystytään tekemään oikeanlaajuisina sekä kohdistettuna oikeaan paikkaan.

Huomionarvoista tutkimuksessa on se, että poratun kalliomassan ennakkotiedolla voidaan katsoa olevan vaikutusta monessa työvaiheessa. Myös sovelluksen erilaisilla ominaisuuksilla käyttömukavuuden suhteen voidaan vaikuttaa ennakkotiedon käsiteltävyyteen ja informatiivisuuteen sekä edelleen saadun informaation mahdollisimman suureen hyödyntämisasteeseen. On myös pidettävä mielessä se, että sovellus on kehitysvaiheessa ja jatkokehitystä vaaditaan, jotta kaikki tutkimuksessa esille tulleet arvopotentialit pystytään hyödyntämään. Mikäli sovelluksen tuotekehitys mahdollistaa sovelluksen luotettavan käytön ja hankkeiden tilaajaosapuolten hyväksynnän, voidaan sillä katsoa olevan merkittävä hyöty tulevaisuuden kalliorakentamisessa, etenkin kehittyvän teknologian aikakaudella.

LÄHTEET

- [1] Dammert, V. Väättäinen, A. 1986. Heikkousvyöhykkeiden geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Tutkimusseloste A75. Vuorimiesyhdistys. Outokumpu. 100s.
- [2] Geologian tutkimuskeskus. Kallioperäkartta. WWW. Saatavilla: <http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kallioperakartta100k>
- [3] Hakapää, A., Lappalainen, P. (toim.). 2011. Kaivos- ja louhintatekniikka. Helsinki: Opetushallitus. ISBN: 978-952-13-4615-6
- [4] Hartikainen, O-P., 1982 Kalliorakennustekniikka, 2. korjattu painos. Espoo, Otapaino. 189s.
- [5] Horn, F. Rakennustuotemallit kalliorakennuskohteiden suunnittelun ja rakentamisen apuvälineinä. 2013. Diplomityö. Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos.
- [6] Jokinen, Juha U.S. Tekniikan lisensiaatti, filosofian maisteri, projektipäällikkö. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. Kallionäytekairaus - menetelmät ja tarkoitus. WWW. Saatavilla: [https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/631CStSjs%3A\\$47\\$RK110304\\$46\\$pdf/RK110304.pdf](https://www.rakennustieto.fi/bin/get/id/631CStSjs%3A47RK110304$46$pdf/RK110304.pdf)
- [7] Kukkonen, J. 2012. Intelligence in modern drill and blast. Tunnels & Tunnelling International. Syyskuu 2012: 36-38, 40s.
- [8] Lehtinen M., Nurmi P., Rämö T. (toim.) 1998. Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry., 375 s. ISBN 952-90-9260-1
- [9] Peltoniemi, M., 1988 Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo. Hämeenlinna, Karisto Oy. 411s.
- [10] Posiva. Maanpäälliset paikkatutkimukset. WWW. Saatavilla: www.posiva.fi/loppusijoitus/tutkimus_ja_kehitys/maanpaalliset_paikkatutkimukset
- [11] Rødseth, M. 2013. Analyse av sammenhenger mellom MWD-data og bergmekaniske parameter. Master's Thesis. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU, Trondheim, Norway.
- [12] Saanio, V., Holopainen, J., Solovjew, N., Seppänen, P., Kupias, P., 1982. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja, 1. painos. Vuorimiesyhdistys r.y. Hanko, Hangon Kirjapaino Oy. 800 s.
- [13] Sandvik Mining and Construction Oy. iSure-ohjelmisto. Kuvankaappaus.

- [14] Sandvik Mining and Construction Oy. WWW. Saatavilla: <http://www.understandingunderground.sandvik.com/products/drill-and-blast/>
- [15] Sandvik Mining and Construction Oy. iSure käyttöohje. 2014.
- [16] Sandvik Mining & Construction Oy. WWW. Saatavilla: <http://construction.sandvik.com>
- [17] Schunnesson H. 1996. RQD predictions based on drill performance parameters. Tunneling and Underground Space Technology. Vol 11. No 3. s 345-351.
- [18] Schunnesson, H. 1998. Rock Characterisation using Percussive Drilling. International Journal of Rock Mechanics and Mining 35 (6). 722-725.
- [19] Schunnesson, H. 2009. Modern tools and equipment for tunnelling and drifting. RDM Safe & Rapid Development Mining 2009: Proceedings of the First International Seminar of Safe and Rapid Development Mining. ed. P. Dight. Nedlands, WA, Australia: Australian Centre for Geomechanics.
- [20] Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006. Kalliotilojen injektointi 2006, by 53. Helsinki, Nykypaino Oy. 61s. ISBN: 952-5075-73-7
- [21] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. Tunneli- ja kalliorakennus. 1-2 / julk. 1987. Helsinki : Suomen rakennusinsinöörien liitto. (RIL / Suomen rakennusinsinöörien liitto; 154-1)
- [22] Tamrock Corp. 1997. Underground Drilling and Loading Handbook. Tampere. 271s.
- [23] Valli, J. 2010. Investigation Ahead of the Tunnel Face by Use of a Measurement-While-Drilling System at Olkiluoto, Finland. Working Report 2010-05. Olkiluoto: Posiva.
- [24] Vuolio, R. 1985. Räjätys- ja louhintatöiden suunnittelu ja suorittaminen, 2.painos. Suomen Maarakentajien Keskusliitto r.y. Helsinki. 256s.

KESKUSTELUT JA HAASTATTELUT

[25] Keskinen, M., kehitysjohtaja; Mannelin, T., työmaainsinööri. Lemminkäinen Infra Oy. Keskustelut ja haastattelut. 2014-2015.

[26] Äikäs, K. Projektipäällikkö. Saanio & Riekkola Oy. Keskustelut ja haastattelut. 2014-2015.